

Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías
Industriales
2016-2017

Trabajo Fin de Grado

“Diseño y análisis de una planta desalinizadora de agua operada con energía geotérmica en las Islas Canarias”

Sandra Camacho Redal

Tutor

Javier Villa Briongos

Leganés, Septiembre de 2017.



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto supone el fin de una etapa, la cual no hubiera sido lo mismo sin las personas que me han apoyado durante todo este tiempo y a lo largo de toda mi vida.

Primero quiero dar las gracias a mi madre, por enseñarme a luchar por mis objetivos y darme ánimos para no rendirme nunca. Gracias por todo tu esfuerzo y por ayudarme a llegar hasta aquí, sin ti nunca hubiera sido posible.

A toda mi familia, por apoyarme en todo momento. En especial a mi abuela Juliana, por cuidarme siempre y enseñarme tantas cosas, por ser una parte fundamental de mi vida y por tratarme como una hija, gracias por todo.

Quiero también dar las gracias a mis amigos, tanto a los de siempre como a los amigos hechos durante estos cuatro años. Sin vosotros este camino no hubiera sido lo mismo.

Quiero dar las gracias a mi tutor Javier Villa Briongos, por su ayuda y disponibilidad, gracias por ayudarme a mejorar y echarme una mano siempre que lo he necesitado.

Por último, quiero dar las gracias a Nacho, por animarme en todo momento y hacer todo más fácil.

RESUMEN

Las energías renovables son una fuente de energía que surge como alternativa al uso de combustibles fósiles en centrales térmicas para la producción de electricidad. El uso de estas energías ayuda a la reducción de la contaminación del planeta, la cual no deja de aumentar sobre todo en los últimos años. En este proyecto, se combina la energía geotérmica con una tecnología de desalinización, la osmosis inversa, para reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y a su vez ayudar a reducir el problema de la escasez de agua potable, el cual supone un gran problema en varios países del mundo.

En este proyecto se analiza la situación de la energía geotérmica a nivel mundial, se elige una localización de la planta de acuerdo con las necesidades y especificaciones del proyecto, y posteriormente, se estudian las diferentes tecnologías de aprovechamiento de la energía geotérmica para elegir la tecnología de desalinización más apropiada. Una vez definida la tecnología a utilizar, se realiza el diseño de la central y se calcula la energía que produce. Por último, se hace un estudio económico sobre la implantación de esta central, para demostrar sus ventajas e inconvenientes.

Índice de contenidos

CAPITULO 1: OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	1
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 3: LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	5
3.1 Energía geotérmica como fuente de energía para procesos de desalinización	6
3.1.1 Yacimientos geotérmicos	8
3.1.2 Desalinización geotérmica	9
3.2 Producción de energía eléctrica mediante energía geotérmica a nivel mundial	10
3.3 Energía geotérmica en España	14
CAPÍTULO 4: LA PLANTA GEOTÉRMICA Y DE DESALINIZACIÓN	16
4.1 Marco legal y normativa aplicable.....	19
4.2 Localización	20
4.3 Tecnología de explotación del recurso geotérmico.....	26
4.3.1 Sondeos geotérmicos	26
4.3.2 Diseños tecnologías de extracción	28
4.4 Tecnología de desalinización	33
5.1 Diseño de la planta	39
5.1.1 Elección del fluido de trabajo	39
5.1.2 Elección de la configuración del ciclo	48
5.1.3 Elementos del ciclo.....	51
5.2 Resultados	57
CAPÍTULO 6: IMPACTO AMBIENTAL	63
6.1 Ventajas medioambientales de las centrales geotérmicas	64
6.1.1 Emisiones gaseosas a la atmosfera	65
6.1.2 Uso del suelo	66
6.1.3 Emisión de solidos	67
6.1.4 Uso del agua	67
6.1.5 Contaminación del agua	68
CAPÍTULO 7: ESTUDIO ECONÓMICO	69
7.1 Presupuesto.....	70
7.1.1 Costes de la fase de construcción.....	70
7.1.2 Costes de la fase de explotación	71
7.1.3 Coste del agua	75
7.2 Impacto socio económico.....	75
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	79
ANEXO I: PROCESOS DE DESALINIZACIÓN	82

ANEXO II: CICLO RANKINE	92
ANEXO III: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS ORGÁNICOS.....	97
ANEXO IV: ELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO	101
ANEXO V: ELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL CICLO	106
BIBLIOGRAFÍA	111

Índice de figuras

Figura 3.1: Gradiente geotérmico.

Figura 3.2: Mapa de las zonas con recurso geotérmico disponible.

Figura 3.3: Potencial geotérmico de la Península Ibérica.

Figura 4.1: Esquema final simplificado de la planta.

Figura 4.2: Mapa de espacios naturales de las Islas Canarias.

Figura 4.3: Mapa de potencia térmica superficial de las Islas Canarias.

Figura 4.4: Clasificación del suelo rústico de las Islas Canarias.

Figura 4.5: Clasificación del suelo rústico de Gran Canaria.

Figura 4.6: Zona de reservas de la biosfera de Gran Canaria.

Figura 4.7: Zonas urbanizables cercanas a la costa en Gran Canaria.

Figura 4.8: Zonas urbanizables 1 y 2.

Figura 4.9: Dimensiones de la zona elegida para la planta.

Figura 4.10: Planta de vapor de destello en una etapa.

Figura 4.11: Planta de vapor de destello en dos etapas.

Figura 4.12: Planta de vapor seco.

Figura 4.13: Planta binaria.

Figura 5.1: Ciclo Rankine ideal.

Figura 5.2: Ciclo ORC simple.

Figura 5.3: Ciclo ORC con IHE.

Figura 5.4: Ciclo ORC con regeneración.

Figura 5.5: Turbina ORC ORCHID de Enertime.

Figura 5.6: Características de la turbina ORCHID.

Figura 5.7: Condensador enfriado por agua.

Figura 5.8: Características del condensador LAPESA.

Figura 5.9: Características de la bomba de extracción SULZER.

Figura 5.10: Características de la bomba de alimentación SULZER.

Figura 5.11: Evaporador PROINCAR.

Figura 5.12: Características del evaporador PROINCAR.

Figura 5.13: Torre de refrigeración.

Figura 5.14: Esquema final de la planta.

Figura A.I.1: Desalinización MED.

Figura A.I.2: Desalinización MSF.

Figura A.I.3: Desalinización CV.

Figura A.I.4: Desalinización por OI.

Figura A.I.5: Desalinización por Electrodiálisis.

Figura A.I.6: Desalinización por Filtrado.

Figura A.II.1: Ciclo Rankine

Figura A.II.2: Diagrama T-s del Ciclo Rankine.

Figura A.II.3: Divergencias entre el ciclo Rankine ideal y el real.

Figura A.III.1: Curvas de saturación de los fluidos orgánicos.

Figura A.IV.1: Diagrama T-s de los fluidos orgánicos secos.

Figura A.V.1: Ciclo IHE-ORC.

Figura A.V.2: Ciclo R-ORC.

Índice de tablas

Tabla 4.1: Tipos de procesos de desalinización.

Tabla 4.2: Características de los procesos de desalinización.

Tabla 5.1: Propiedades de los fluidos orgánicos.

Tabla 5.2: ODP y GWP de los fluidos orgánicos.

Tabla 5.3: Inflamabilidad de los fluidos orgánicos.

Tabla 5.4: Resultados del ciclo Rankine ideal con R134a y R245fa.

Tabla 5.5: Resultados de la comparación de distintas configuraciones del ORC.

Tabla 5.6: Datos de partida del ciclo.

Tabla 5.7: Fórmulas de potencia de los componentes del ciclo.

Tabla 5.8: Parámetros que definen el punto 1 del ciclo.

Tabla 5.9: Parámetros que definen el punto 2s del ciclo.

Tabla 5.10: Parámetros que definen el punto 2 del ciclo.

Tabla 5.11: Parámetros que definen el punto 3 del ciclo.

Tabla 5.12: Parámetros que definen el punto 4s del ciclo.

Tabla 5.13: Parámetros que definen el punto 4 del ciclo.

Tabla 6.1: Emisiones gaseosas de varias centrales térmicas.

Tabla 7.1: Costes de la fase de construcción.

Tabla 7.2: Costes fijos de personal en la fase de explotación.

Tabla 7.3: Costes fijos de mantenimiento en la fase de explotación.

Tabla 7.4: Otros costes fijos.

Tabla 7.5: Costes variables de personal en la fase de explotación.

Tabla 7.6: Costes variables de productos químicos en la fase de explotación.

Tabla 7.7: Costes variables de mantenimiento la fase de explotación.

Tabla 7.8: Costes variables de refrigerante en la fase de explotación.

Tabla 7.9: Costes variables de accesorios en la fase de explotación.

Tabla 7.10: Resumen de los costes de explotación.

Tabla 7.11: Análisis de rentabilidad.

Tabla A.I.1: Tipos de procesos de desalinización.

Tabla A.IV.1: Datos de partida.

Tabla A.IV.2: Resultados del ciclo del R134a.

Tabla A.IV.3: Resultados del ciclo del R245fa.

Tabla A.V.1: Resultados del IHE-ORC.

Tabla A.V.2: Resultados del R-ORC.

Índice de gráficas

Gráfica 3.1: Capacidad geotérmica instalada y producción eléctrica a nivel mundial.

Gráfica 3.2: Previsión del crecimiento de la generación geotérmica.

Gráfica 3.3: Capacidad geotérmica instalada a finales del año 2015.

Gráfica 3.4: Generación eléctrica a partir de energías renovables como porcentaje de la generación total.

Gráfica 4.1: Energía específica consumida por kg de agua dulce y kg CO₂ emitidos por m³ de agua.

Gráfica 6.1: Emisiones gaseosas de varias centrales térmicas.

Abreviaturas

ORC – Organic Rankine Cycle
IEA – International Energy Agency
MED – Destilación Multi-Efecto
VTE – Evaporación Multi-Efecto en tubos verticales
MSF – Evaporación Súbita Multi-Etapa
VC – Compresión Mecánica de Vapor
VCT – Compresión Térmica de Vapor
OI – Osmosis Inversa
ED – Electrodialisis
UF – Ultrafiltración
MF – Microfiltración
NF – Nanofiltración
CO₂ – Dióxido de carbono
ODP – Ozone Depletion Potential
GWP – Global Warming Potential
W_t – Potencia de la turbina
Q_{cond} – Calor cedido en el condensador
W_b – Potencia de la bomba
Q_{evap} – Calor absorbido en el evaporador
IHE – Intercambiador de Calor Interno
rpm – Revoluciones Por Minuto
η – Rendimiento
FCRC – Flash Crystallizer Reactor Clarifier
NCG – Gases No Condensables
H₂S – Sulfuro de Hidrógeno
SO₂ – Dióxido de azufre
NO_x – Oxídos de Hidrógeno
C_p – Capacidad calorífica
VAN – Valor Actual Neto
TIR – Tasa Interna de Retorno
T – Temperatura
kJ – Kilojulio
kW – Kilovatio
m³ – Metros cúbicos
Pa – Pascales
Bar – Bares
h – Horas
K – Grados Kelvin



CAPITULO 1: OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO



El principal objetivo de este proyecto es diseñar una planta desalinizadora de agua que produzca 200.000 litros/día en las Islas Canarias y que esté alimentada con energía geotérmica aprovechando el origen volcánico de estas islas. Para llegar a este objetivo final, se deben cumplir primero otros objetivos:

- Determinar el papel que representa actualmente la energía geotérmica en la producción eléctrica a nivel mundial.
- Determinar la situación de la energía geotérmica en España con el objeto de estudiar la viabilidad del proyecto.
- Caracterizar la central por medio de su localización, la tecnología de extracción del recurso geotérmico, tecnología de aprovechamiento del calor geotérmico y tecnología de desalinización en función de las necesidades tecno-económicas de la planta.
- Realizar un análisis ambiental que muestre los impactos tanto negativos como positivos de esta nueva tecnología.
- Realizar un análisis económico que verifique la viabilidad económica a largo plazo de la central desalinizadora geotérmica.

A lo largo de este proyecto se intenta mostrar la importancia del aprovechamiento de las energías renovables, en este caso la geotermia, una tecnología hasta ahora poco conocida en España. Para ello se diseña un sistema binario de fluido geotérmico y fluido orgánico con el objetivo de obtener el máximo aprovechamiento de este recurso. Se comparan varios fluidos orgánicos para optimizar el uso la energía geotérmica extraída, y se elige la configuración del ciclo más viable desde el punto de vista tecno-económico.

Por otro lado, se elige una técnica desalinizadora teniendo en cuenta la localización de la central, el consumo de energía de cada técnica, la capacidad de producción de cada una y la durabilidad de los equipos correspondientes con el fin de optimizar la energía geotérmica extraída previamente y transformada en energía eléctrica gracias al ciclo ORC.

Finalmente, para estudiar el impacto socio-económico de la central, se realiza un presupuesto de la construcción de la planta y un análisis de rentabilidad de esta para comprobar la viabilidad de la misma.



CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN



Hoy en día, el agua se ha convertido en un bien escaso ya que los suministros de agua son recursos limitados y el aumento del desarrollo tecnológico, los altos niveles de vida y la urbanización masiva han provocado un incremento de la demanda de agua.

Por otro lado, las reservas de agua en el mundo están siendo afectadas por la contaminación. Los desechos arrojados a aguas receptoras, tales como residuos industriales y químicos, reducen aún más las reservas de agua, y el calentamiento global, la escasez de lluvia y las sequías son otro factor determinante en la disminución de los niveles de agua potable.

Esto ha obligado a buscar alternativas para satisfacer la demanda de agua actual: la energía y los recursos para obtener agua están relacionados, usamos energía para ayudarnos a transportar el agua dulce, y además usamos el agua para ayudarnos a producir la energía que necesitamos. Hay un gran paralelismo entre el crecimiento de la crisis del agua y los conflictos sobre el uso de energías no renovables, así como también entre la solución a ambos problemas.

Como solución al problema del agua, una propuesta que está cobrando cada vez más fuerza es la desalinización del agua de mar. El agua marina constituye un 99% del agua total del planeta, por lo que transformar esta agua en agua potable es una muy buena alternativa para combatir la escasez de agua. Una de las mayores ventajas de la desalinización es que consume menos de energía que la requerida para trasladar el agua desde los embalses, lo cual hace muy llamativa esta propuesta de acuerdo con el ahorro energético que buscamos.

Para que este proceso de desalinización además de ayudar a acabar con la escasez de agua pueda ayudar a contaminar el medio ambiente lo menos posible, la energía utilizada para operar este proceso va a proceder de una fuente de energía renovable, entre las cuales hemos elegido la energía geotérmica por ser una energía barata, que no implica riesgos y que además produce una cantidad mínima de residuos. La energía geotérmica está muy desaprovechada en España, pues por la zona en la que está ubicado nuestro país, la energía geotérmica podría cubrir parte de la demanda energética española.

En definitiva, es necesario potenciar las energías renovables, ya que todavía se puede sacar mucho más partido de ellas, para poder mejorar el medio ambiente y reducir la contaminación y los efectos secundarios que están provocando un daño irreversible en el planeta. A su vez, es importante acabar con el problema de la escasez de agua, que es un problema mundial y cada vez tiene una importancia mayor.



CAPÍTULO 3: LA ENERGÍA GEOTÉRMICA



En este capítulo se muestran las características de la energía geotérmica, así como su origen y sus usos, y la situación actual de la geotermia a nivel mundial. Se presentan las múltiples ventajas de la tecnología combinada geotérmica-desalinizadora, y se analiza la situación de la geotérmica en España.

Las energías renovables cobran cada vez más importancia en nuestro día a día; quizás no alcancen todavía a las energías convencionales, aunque poco a poco se van dando a conocer avances que abren el camino hacia el futuro de las energías. Dentro de las energías renovables podemos distinguir la energía solar, eólica, geotérmica, hidráulica, biomasa... las cuales son la fuente de energía más limpia hasta el momento, ya que son respetuosas con el medio ambiente y no contaminan en abundancia.

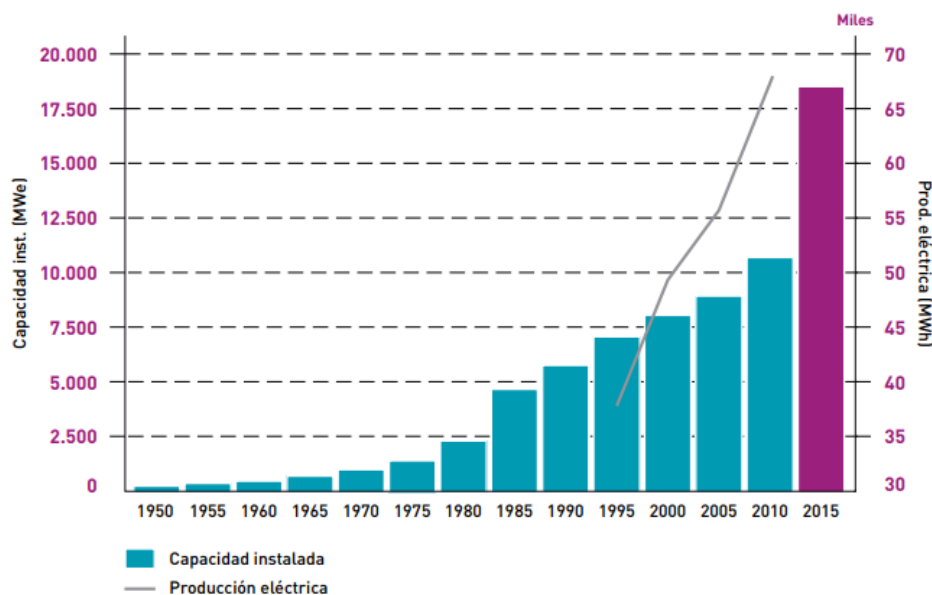
3.1 Energía geotérmica como fuente de energía para procesos de desalinización

Particularmente, la energía geotérmica es un tipo de energía renovable obtenida a partir del aprovechamiento de calor del interior de la Tierra. Esta energía tiene su origen en una fuente de calor magmática, que se encuentra a varios kilómetros de profundidad.

Se trata de una energía renovable cuyo verdadero potencial todavía se desconoce. Quizás es por eso que es una energía poco explotada en la actualidad, pese a que tiene ciertas ventajas frente a las otras renovables, y la principal es que se trata de una energía independiente de la estación del año, lo cual permite que la extracción de calor del interior de la Tierra sea constante durante todas las estaciones. Esto la convierte en una energía con un suministro fiable y estable, ideal para la desalinización.

Según la IEA [1], en 2014 la generación de energía geotérmica se situó en 77 TWh, mientras que la capacidad acumulada alcanzó más de 12 GW. La capacidad instalada recientemente se situaría en torno a 0,8 GW. Se prevé que la capacidad geotérmica mundial aumentará a más de 16 GW en 2020. En el lado de la generación, los recursos geotérmicos deberían proporcionar alrededor de 104 TWh a nivel mundial en 2020.

En la siguiente figura podemos ver la evolución de la capacidad instalada y la producción eléctrica, donde podemos observar como aumentan exponencialmente con el paso de los años:



Gráfica 3.1: Capacidad geotérmica instalada y producción eléctrica a nivel mundial [2]

Como se ha dicho antes, en esta gráfica se puede comprobar que tanto la capacidad instalada como la producción eléctrica han aumentado de manera significativa con el paso de los años, sobre todo en los 15 últimos, lo cual es un avance en el desarrollo de esta tecnología de producción de electricidad.

El origen de la energía geotérmica está en el calor que se encuentra en el interior de La Tierra. Nuestro planeta se compone de tres capas concéntricas; la corteza, el manto, y el núcleo. Según nos vamos acercando al centro de la tierra, la temperatura aumenta y a esto se lo conoce como gradiente geotérmico.

El gradiente geotérmico se define como el incremento de temperatura registrado al profundizar desde la capa más externa de la Tierra –la corteza– hacia las partes interiores de la misma. Por lo general la temperatura aumenta entre 2 y 4 grados centígrados a medida que nos adentramos 100 metros hacia el interior de la Tierra, pero depende en gran medida de la zona geográfica en la que nos encontremos. En la Figura 3.1 podemos ver la variación de la temperatura en función de la profundidad de la Tierra:

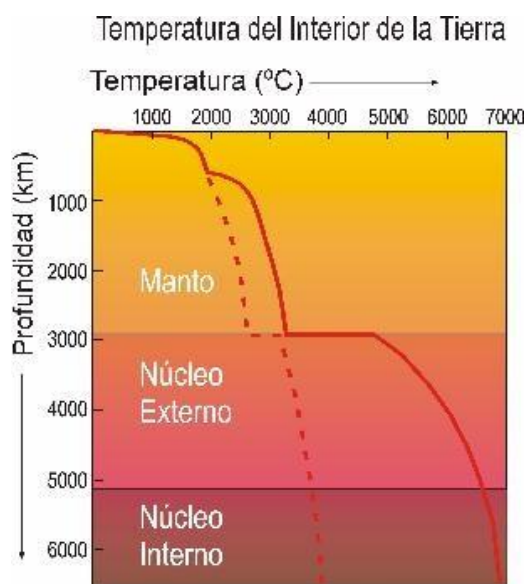


Figura 3.1: Gradiente geotérmico [3]

Además la energía geotérmica puede tener diferentes orígenes dependiendo de la zona geográfica en la que se encuentre, del recurso híbrido que haya en el yacimiento o de la profundidad del pozo.

3.1.1 Yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos son los pozos de donde se extrae el fluido geotérmico y los cuales se pueden clasificar según la temperatura del recurso [4]:

- **Yacimientos de alta entalpia:** Existe un foco de calor, donde el fluido se almacena a más de 150°C. Este foco está rodeado de rocas permeables, que están rodeadas de otras rocas con grietas. De estos yacimientos se obtiene agua y vapor a muy alta temperatura y presión, por lo que suelen utilizarse para generar energía eléctrica.
- **Yacimientos de media-baja entalpia:** La temperatura del fluido se encuentra entre 30 y 150 °C. Se utiliza el agua del yacimiento directamente para proporcionar calefacción y agua caliente en pueblos y ciudades, balnearios, invernaderos... En algunos casos puede emplearse para producción eléctrica (haciendo uso de determinadas tecnologías que permiten generar electricidad a partir de temperaturas inferiores a las comúnmente explotadas).



- **Yacimientos de muy baja temperatura:** El fluido se encuentra a menos de 30 °C. Se aprovecha tanto el calor que se genera bajo la corteza terrestre como el calor que absorbe procedente del sol. Su funcionamiento se basa en la temperatura del interior del terreno, que se mantiene constante durante todo el año. El circuito de intercambio subterráneo extrae calor del terreno y con una bomba de calor lo transmite al edificio en invierno, calentándolo. Por el contrario, en verano el edificio se refrigera al cederse calor al terreno a través del mismo circuito de intercambio. La bomba de calor, al funcionar sin combustión, no produce humos ni contaminación, es segura y requiere muy bajo mantenimiento.

3.1.2 Desalinización geotérmica

La utilización de energía geotérmica tiene múltiples beneficios tanto para aplicaciones industriales como domésticas. Es una tecnología adecuada para la generación de electricidad, calefacción y refrigeración, y otras aplicaciones en procesos industriales. En particular, la energía geotérmica es beneficiosa para la desalinización porque presenta las siguientes ventajas [5]:

- Las fuentes de energía geotérmica proporcionan un suministro de calor estable y fiable, lo cual asegura la estabilidad de la instalación desalinizadora.
- Tiene un alto factor de capacidad (este factor se define como la disponibilidad de los recursos, tanto en términos de calidad como de cantidad).
- Las temperaturas típicas encontradas en una fuente geotérmica de media temperatura están en el rango de 70-100 °C, lo cual las hace idóneas para la desalinización por Destilación Multi-Efecto (MED) de baja temperatura. Pero también podemos encontrar fuentes a una temperatura superior a los 100 °C, que son ideales para la generación de energía. Esto nos permite un amplio rango de posibilidades a la hora de elegir la tecnología de desalinización que queremos usar.
- La extracción de calor de los acuíferos es una tecnología que cuenta con la ventaja de ser independiente de la estación del año y de los cambios de clima.
- La desalinización geotérmica es la única energía renovable que no genera emisiones de contaminantes atmosféricos que favorecen el efecto invernadero, esto la hace una de las energías más respetuosas con el medio ambiente.
- La energía geotérmica como energía renovable permite el ahorro de combustibles fósiles, lo cual mejora la seguridad energética local y la sostenibilidad ambiental.



- Los yacimientos de extracción de energía geotérmica tienen un área superficial relativamente baja, lo cual reduce el impacto ambiental.

El uso directo y la generación de energía con fuentes de energía geotérmica están creciendo a un ritmo constante en todo el mundo. Aunque hay zonas donde se podría aprovechar la energía geotérmica a gran escala, las fuentes de energía geotérmica han sido poco utilizadas en aplicaciones de desalinización pero tienen potencial para servir como excelentes fuentes de calor para estos procesos.

Los procesos de desalinización requieren grandes cantidades de energía, por lo que la energía geotérmica es una opción muy factible, sostenible y ecológica. Una de las ventajas al utilizar energía geotérmica es que el consumo de energía externa se reduce al mínimo, excepto por los requerimientos de energía mecánica. Los procesos de desalinización geotérmica producen menos impacto ambiental en comparación con otros procesos operados con energías no renovables, además los residuos que produce son mínimos comparados con los originados por el petróleo y el carbón. Gracias a las fuentes de energía geotérmica los sistemas de cogeneración para la producción simultánea de agua y electricidad son posibles.

3.2 Producción de energía eléctrica mediante energía geotérmica a nivel mundial

La energía geotérmica es una de las energías renovables menos conocidas y menos aprovechadas. Aunque el uso de fuentes termales geotérmicas se conoce desde la antigüedad, la explotación geotérmica activa con fines industriales comenzó a principios del siglo XIX con el uso de fluidos geotérmicos (ácido bórico) en Italia [6]. A finales del siglo XIX, el primer sistema de calefacción geotérmica comenzó a operar en Estados Unidos, y en Islandia en los años veinte. A principios del siglo XX, nuevamente en Italia, se logró el primer intento exitoso de producir electricidad a partir del calor geotérmico. Desde entonces, la electricidad geotérmica instalada ha aumentado constantemente.

El potencial mundial de este recurso energético supone unos 30 millones de teravatios, sin embargo, no toda esta energía es aprovechable. En la Figura 3.2 podemos ver las regiones que poseen recursos térmicos accesibles:

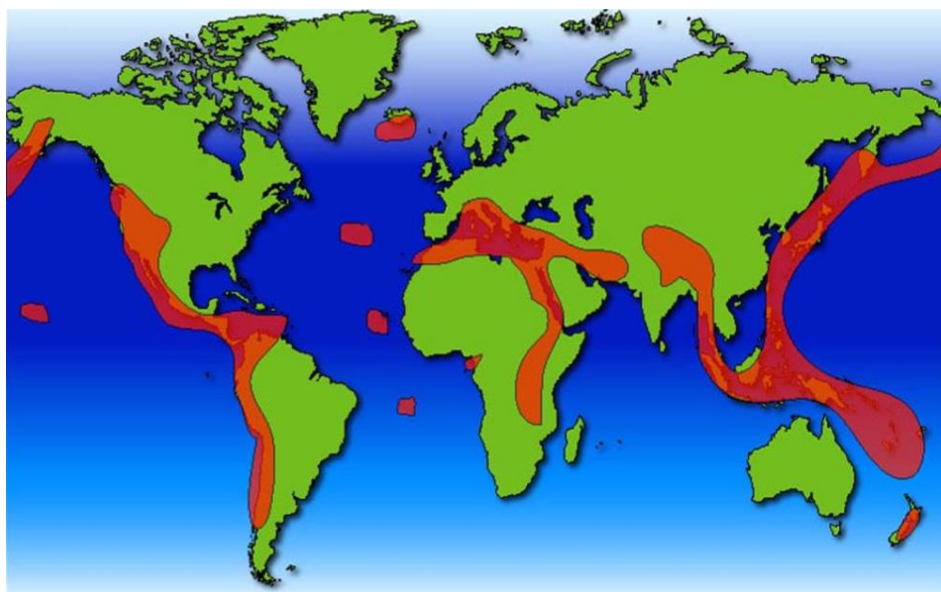


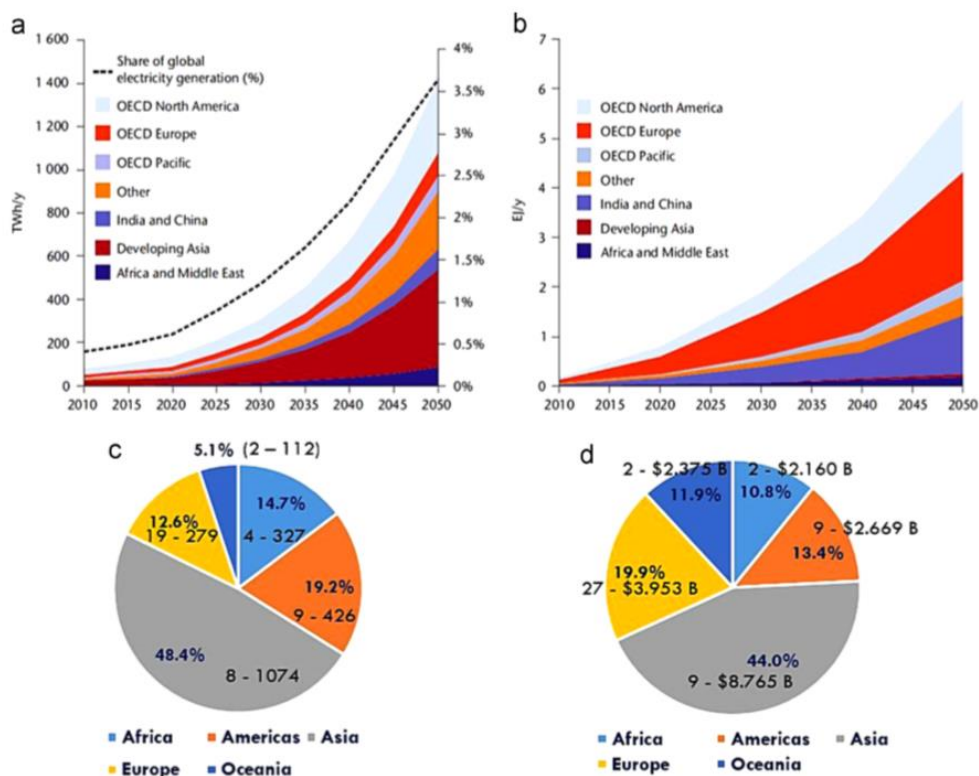
Figura 3.2: Mapa de zonas con recurso geotérmico accesible [7]

En esta figura se puede ver que hay zonas bastante limitadas donde se puede aprovechar el recurso geotérmico para generar energía eléctrica, por lo que aunque la energía geotérmica tiene un gran potencial, no toda puede ser utilizada.

Se estima que para el año 2050, la generación de electricidad geotérmica podría alcanzar 1 400 TWh al año, es decir, alrededor del 3,5% de la producción mundial de electricidad, evitando casi 800 megatoneladas de emisiones de CO₂ por año [6].

En la Grafica 3.2 podemos ver la predicción de la tendencia de crecimiento de la generación geotérmica en todo el mundo hasta el año 2050 en diferentes términos:

- a) Producción de electricidad [TWh/año]
- b) Utilización directa del calor [EJ/año]
- c) Número de pozos perforados entre 2010 y 2014
- d) Inversiones en miles de millones entre los años 2010 y 2014



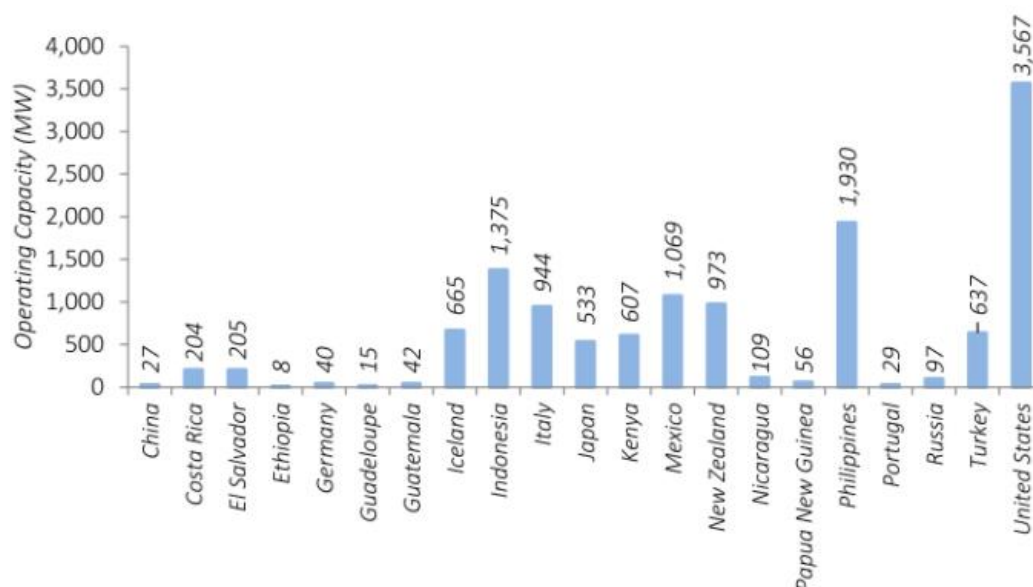
Gráfica 3.2: Previsión crecimiento de la generación geotérmica [5]

Las graficas a) y b) muestra las tendencias de crecimiento geotérmico mundial proyectadas entre 2010 y 2050 en términos de producción de electricidad (TWh/año), así como el uso directo (EJ/año), respectivamente. Las graficas c) y d) muestra el número de pozos perforados y las inversiones en mil millones entre 2010 y 2014, respectivamente.

Podemos ver como se espera que el papel de la energía geotérmica en la producción mundial de electricidad aumente bruscamente en los próximos años. Se estima que para el año 2050, la generación de electricidad geotérmica podría alcanzar 1 400 TWh al año, es decir, alrededor del 3,5% de la producción mundial de electricidad, evitando casi 800 megatoneladas de emisiones de CO₂ por año.

Mientras tanto, la utilización de calor geotérmico en todo el mundo podría llegar a 5,8 EJ anualmente contribuyendo a la demanda total de calor en hasta un 4% en el año 2050 [5]. Entre 2015 y 2030, se producirá una rápida expansión de la electricidad geotérmica y la producción de calor, dominada por el despliegue acelerado de los recursos hídricos convencionales de alta temperatura, impulsada por una economía relativamente atractiva, pero limitada a las zonas donde se disponga de dichos recursos.

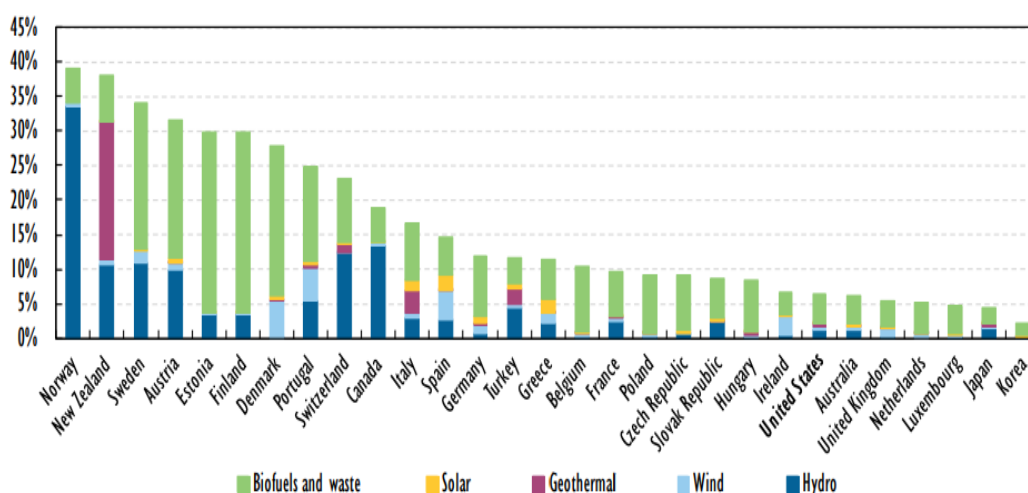
En la siguiente gráfica podemos ver la capacidad geotérmica instalada a finales del año 2015, en la cual podemos apreciar cuales son los países pioneros en el desarrollo de esta tecnología de generación de electricidad, y de los cuales hablaremos más adelante:



Gráfica 3.3: Capacidad geotérmica instalada a finales del año 2015 [8]

En esta gráfica podemos ver como hay países como Estados Unidos, Filipinas o Indonesia que destacan sobre el resto, sin embargo España ni aparece en el gráfico. En nuestro país, aunque algunas energías renovables estén cobrando un peso importante, tales como la energía eólica o la energía solar, la energía geotérmica se mantiene ajena a la producción de electricidad. Aunque la geotérmica es bastante utilizada en zonas del norte de la península como bomba de calor, la generación de electricidad estaría limitada a las Islas Canarias, por su origen volcánico.

Sin embargo este gráfico solo muestra la producción total eléctrica de cada país, pero si comparamos la producción geotérmica con el resto de renovables en cada país, el grafico queda de la siguiente manera:



Gráfica 3.4: Generación eléctrica a partir de energías renovables como porcentaje de la generación total [9]

En este gráfico podemos ver como los países que más han invertido en dedicación a la energía geotérmica son Nueva Zelanda, Italia, Turquía y un país que no aparece en el gráfico pero también destaca por su dedicación a la energía geotérmica, el cual es Islandia. Todos estos países son un referente en aprovechamiento de la energía geotérmica, lo cual tiene numerosos beneficios, no solo el abaratamiento de la energía eléctrica, también la poca independencia energética del exterior y la reducción notable de la contaminación.

En este gráfico sí que aparece España pero se puede observar como la energía geotérmica dedicada a la generación de electricidad es nula pese a que el porcentaje dedicado a las renovables es relativamente alto en comparación con muchos países.

3.3 Energía geotérmica en España

España por el momento se mantiene ajena a este desarrollo tecnológico. Todavía no existe ninguna planta de producción de electricidad a partir de la geotermia en toda la península a día de hoy. Esto se debe fundamentalmente a los altos costes de inversión de estas instalaciones. La explotación de la energía geotérmica en España supondría poder generar una cantidad de electricidad equivalente a cinco veces la capacidad eléctrica instalada en la actualidad. En la siguiente imagen podemos ver el potencial geotérmico de la península ibérica:

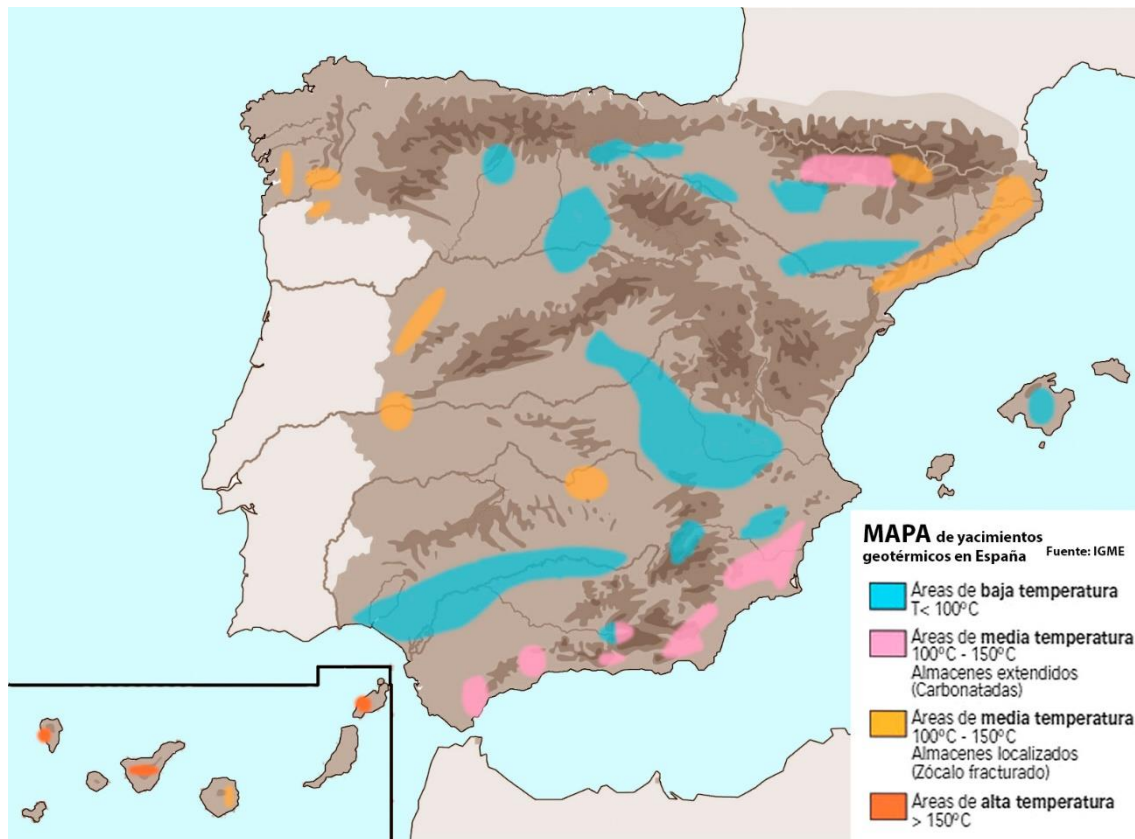


Figura 3.3: Potencial geotérmico de la península ibérica [10]

Como podemos ver en la imagen anterior, las zonas con un mayor potencial geotérmico en la península son Cataluña, Galicia y algunas zonas de la Meseta central. Hoy en día es posible disponer de tecnologías para la producción de electricidad geotermia gracias a los avances tecnológicos y las mejoras en la prospección y perforación, a partir de yacimientos geotérmicos de temperaturas inferiores a las que se necesitaban años atrás. Pero la inversión inicial todavía es elevada, lo cual ha provocado que su desarrollo esté paralizado ya que en España los recursos disponibles son en su mayoría de media y baja temperatura (entre 30 y 150°C) por lo que España se encuentra a la espera de mejoras disponibles.

Sin embargo, las Islas Canarias se distinguen de la península puesto que poseen yacimientos de alta temperatura (por encima de 150°C) lo cual las hace ser una zona ideal para explotar el yacimiento geotérmico con el objetivo de obtener energía eléctrica.



CAPÍTULO 4: LA PLANTA GEOTÉRMICA Y DE DESALINIZACIÓN

En este capítulo se va a realizar un estudio de las tecnologías que se van a poder emplear en la planta desalinizadora, analizando aspectos positivos y negativos de todas las posibilidades que se pueden implementar, para después poder hacer la elección adecuada, tanto para la extracción del recurso geotérmico como para la desalinizadora.

Con respecto a la desalinización, se estudiarán los distintos tipos de tecnologías más utilizadas, se comparará la energía específica consumida y los kilogramos de CO₂ emitidos de cada una de las técnicas desalinizadoras.

En referencia a la tecnología de extracción del recurso geotérmico se estudiarán los tipos de sondeos geotérmicos, y se definirá cada tipo de tecnología de extracción para finalmente poder elegir la mejor opción para el sistema combinado de planta desalinizadora geotérmica.

Una vez definidas ambas partes de la central, y elegidas las tecnologías más convenientes para rentabilizar la planta, el resultado final será:

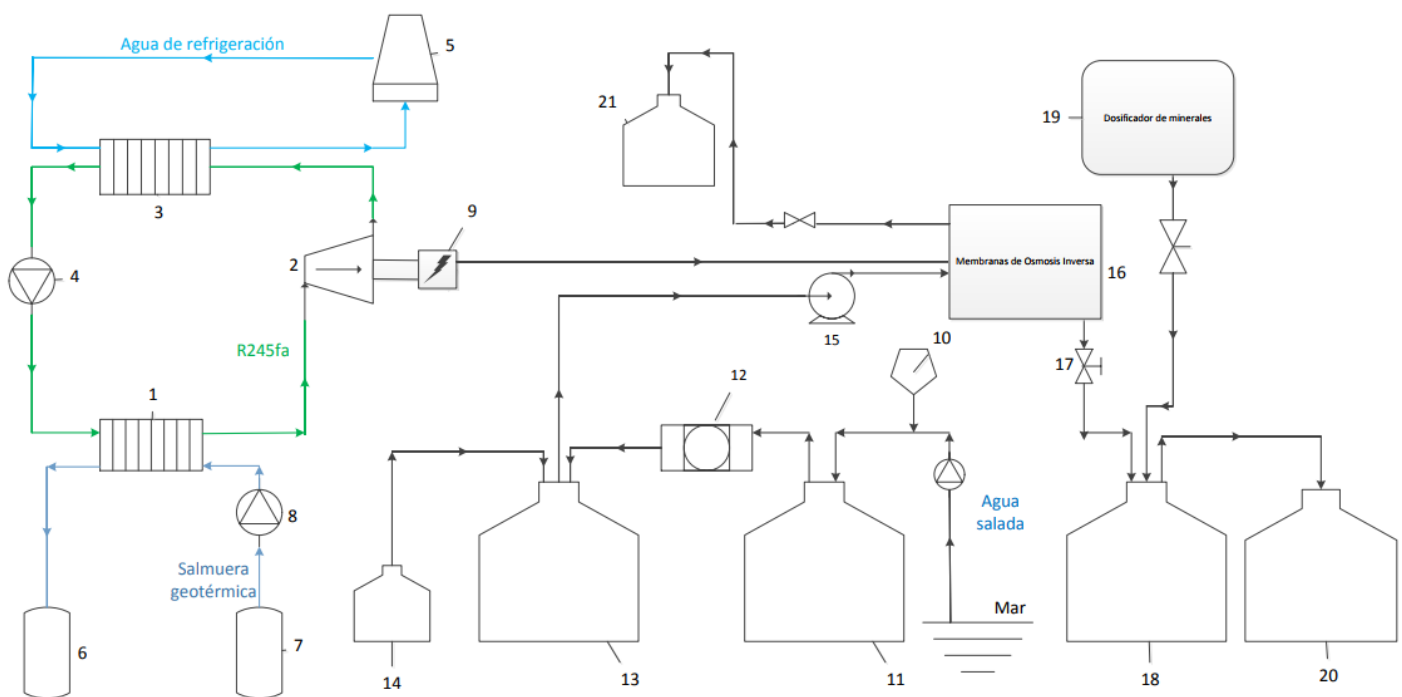


Figura 4.1: Esquema simplificado de la central [Elaboración propia]



Número	Elemento
1	Evaporador
2	Turbina
3	Condensador
4	Bomba de alimentación
5	Torre de refrigeración
6	Pozo de reinyección
7	Pozo de extracción
8	Bomba de extracción
9	Generador eléctrico
10	Regulador de PH
11	Tanque de agua de mar
12	Filtro
13	Tanque de agua filtrada
14	Pre-Tratamiento de aditivos químicos
15	Bomba
16	Membranas de Ósmosis Inversa
17	Válvula
18	Tanque de agua dulce
19	Post-Tratamiento
20	Tanque de agua apta para el consumo
21	Tanque de salmuera

Leyenda de la figura 4.1

4.1 Marco legal y normativa aplicable

Actualmente en España, los recursos geotérmicos no tienen ninguna normativa definida específicamente para ellos, y su aprovechamiento no está del todo regulado. Para poder desarrollar la explotación de los recursos geotérmicos, es necesario un marco legal y administrativo que regule la investigación, extracción y aprovechamiento de tales recursos.

La ley no clasifica de manera precisa los recursos geotérmicos, ya que están regulados actualmente en la legislación española como un recurso minero, por lo que se acoge a la Ley de Minas de 21 de Julio de 1973. En el artículo 23.1 hace una clasificación de las aguas minerales y los recursos geotérmicos se definirían como aguas termales ya que esta ley dice “Son aguas termales aquellas cuya temperatura de surgencia sea superior en 4º C. a la media anual del lugar donde alumbren” [11] Pero esta no es una definición muy precisa del agua geotérmica.

Sin embargo si acudimos al Real Decreto 2857/1978 de 25 de Agosto por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería, reitera los conceptos del artículo 23 de la ley, pero además desarrolla la legislación vigente y en el artículo 5.1 incluye los recursos geotérmicos en la sección C, “Pertenecen a la Sección C) cuantos yacimientos minerales y demás recursos geológicos no estén clasificados en las Secciones anteriores y sean objeto de explotación o aprovechamiento conforme a la Ley de Minas. Son recursos geotérmicos, incluidos en esta Sección, aquellos entre los geológicos que por su temperatura puedan permitir, entre otras aplicaciones, la obtención de energía, en especial térmica, por intermedio de fluidos. Las aguas termales, tal como se definen en este mismo artículo, quedan fuera de la Sección C).” [12]

Además de esto, la ley 58/1980 del 5 de Noviembre la cual modifica la Ley de Minas se centra en los recursos minerales energéticos, por ello en su artículo 1º excluye algunos recursos mineros de la Sección C) y crea una nueva Sección D) en la que incluye entre otros, los recursos geotérmicos. [13] Esta nueva sección, más específica, sigue los preceptos de la Ley de Minas aplicados a la Sección C).

Con respecto al aprovechamiento de los recursos, según dice el artículo 2º del Real Decreto 2857/1978 de 25 de Agosto, es necesario un permiso de exploración o una concesión de explotación. EL permiso de exploración se otorga sobre una extensión determinada en cuadrículas mineras, con un mínimo de 300 y un máximo de 3000. Con respecto al permiso de investigación, la extensión mínima del permiso es una cuadrícula, y tiene un máximo de 300. Además establece algunas restricciones de proximidad a carreteras, edificios, ferrocarriles, canales, acequias... todas ellas se muestran en el artículo 3 de esta Ley.



Por otro lado, con respecto a la utilidad de la planta de desalinizar agua, es necesario también tener en cuenta la regulación correspondiente a obtener agua del mar. El Real Decreto 1327/1995 del 28 de Julio [14], en el artículo 3 establece el procedimiento de concesión de una desaladora de agua marina, el cual se pone en marcha “Cuando sea preciso conseguir una mejor satisfacción de las demandas de agua, incrementar las disponibilidades de este recurso o proteger su calidad” entonces se podrá acordar por el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente la instalación de plantas desalinizadoras de agua marina. Este Ministerio podrá sacar a concurso público la explotación, o construcción y explotación de la desalinizadora.

Además el artículo 4 describe el proceso de Autorización de la actividad de desalación de agua de mar a particulares. Este artículo regula que se puede solicitar al organismo de cuenca correspondiente una autorización para desalar el agua de mar si el recurso se destina al propio consumo o a la prestación de servicio público de su competencia, como por ejemplo en este caso, la escasez de agua.

Es importante destacar la legislación ambiental, recogida en el artículo 5 de la misma ley, el cual dice textualmente “Si las instalaciones de desalación originan o pudieran originar vertidos, tales vertidos requerirán autorización de la Administración competente según la legislación estatal y autonómica aplicable, independientemente de la concesión de ocupación de dominio público.”

En resumen, con todo esto se puede comprobar que uno de los grandes problemas de la energía geotérmica es que es un recurso escaso de regulación legal específica, lo cual dificulta muchas veces la explotación de los recursos por desconocimiento o falta de iniciativas.

4.2 Localización

En las Islas Canarias, el agua se ha convertido en un recurso limitado de primera necesidad. Las lluvias son escasas, y se aprovecha menos del 25% ya que la evapotranspiración es elevada y la pendiente de los barrancos muy elevada, por lo que se logra retener muy poca agua. Esta escasez condiciona en gran medida el desarrollo social y económico de la población. Además, las islas carecen de flujos naturales de agua, por lo que tienen una alta demanda de agua potable.

El archipiélago Canario tiene una gran riqueza natural, y el gobierno de Canarias realiza un gran esfuerzo por mantener dentro de sus posibilidades la riqueza propia de las islas para conservar su patrimonio. Por tanto, es necesaria una planificación territorial para una correcta gestión del suelo y de los recursos naturales.

El origen volcánico de las Islas Canarias las convierte en un núcleo importante en la generación de energía geotérmica. Además el archipiélago canario tiene una gran riqueza natural la cual el gobierno está haciendo un gran esfuerzo por proteger.

Por este motivo, el gobierno canario ha establecido una planificación del territorio para una buena gestión del suelo y sus recursos. Podemos clasificar el territorio en diferentes áreas de protección de los espacios naturales, las cuales podemos ver en el siguiente mapa:

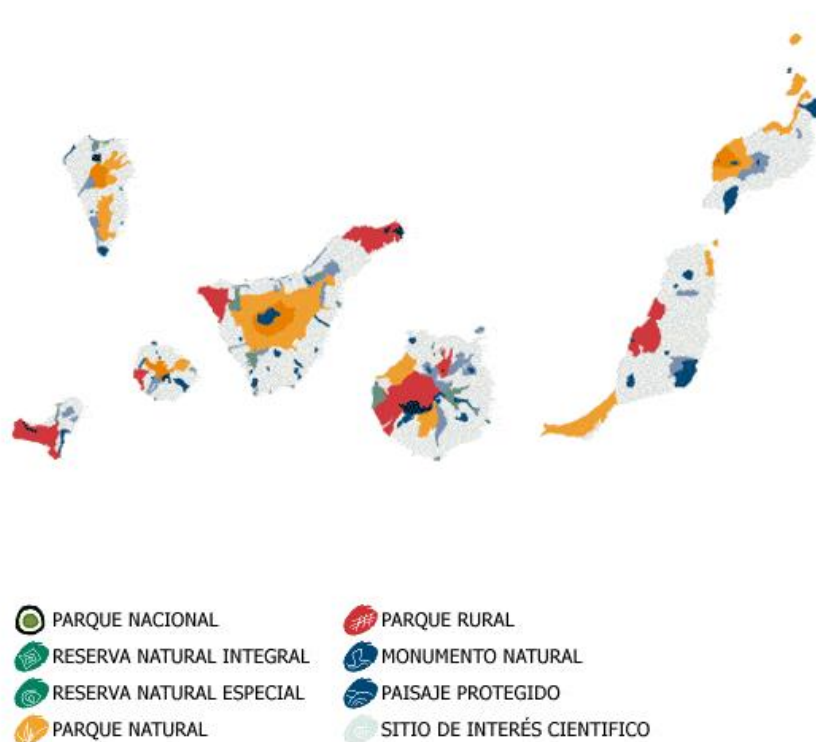


Figura 4.2: Mapa de espacios naturales protegidos de las Islas Canarias [15]

En base a este mapa deberemos elegir la zona en la que vamos a construir la planta puesto que el gobierno debe permitir la instalación de esta.

Haciendo un análisis más detallado del archipiélago, habrá que estudiar el potencial geotérmico de cada zona, para elegir una zona acorde con la tecnología desalinizadora que se va a utilizar. Para ello necesitaremos un yacimiento de alta entalpia, es decir que su temperatura sea próxima a los 150 °C. En la siguiente imagen podemos ver el mapa de potencia térmica superficial de las Islas Canarias:

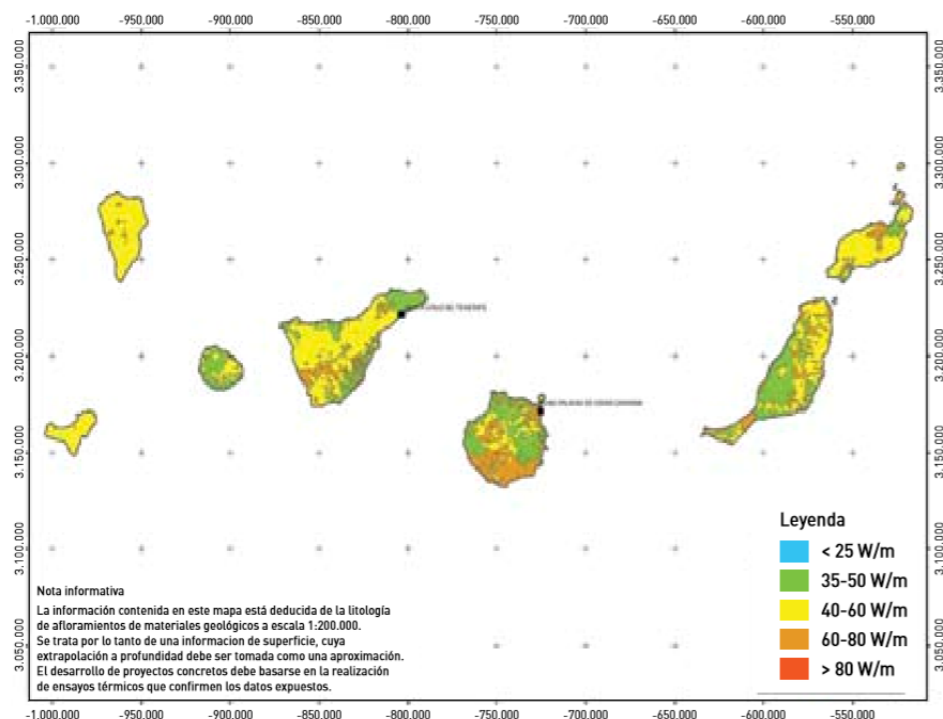


Figura 4.3: Mapa de potencia térmica superficial de las Islas Canarias [2]

En resumen, los requisitos que debe cumplir la zona son:

- La planta no podrá situarse cerca de zonas de protección natural, de acuerdo con la Ley 7/2009, de 6 de mayo, de modificación del Texto refundido de las Leyes de Ordenación del Territorio de Canarias y de Espacios Naturales de Canarias sobre declaración y ordenación de áreas urbanas en el litoral canario.
- La planta geotérmica se puede situar en la isla de Gran Canaria o Tenerife, por su alto potencial geotérmico, además de que son las dos islas con mayor población.
- La instalación debe estar situada en una zona próxima a la costa, para hacer más sencillo el transporte de agua marina.
- Para evitar problemas de contaminación acústica, la planta se situará lo más lejos posible de núcleos urbanos.
- Es conveniente que la planta se sitúe cerca de alguna red viaria de carreteras, y cerca de alguna red eléctrica.

Una vez definidos los requisitos, podemos estudiar más a fondo el territorio para definir exactamente la localización de la planta. Para ello nos ayudaremos de la herramienta “Sistema de información territorial” [16] del gobierno de Canarias.

Estableceremos un único filtro, suficiente para identificar la zona, en “Ordenación del territorio” seleccionaremos “Planteamiento urbanístico y de Espacios Naturales” donde podremos ver la clasificación del suelo en 3 partes diferenciadas:



Figura 4.4: Clasificación del suelo rústico de las Islas Canarias [Elaboración propia]

Vemos que queda muy limitada la zona en la que podremos construir nuestra planta, por lo que con esta sencilla clasificación del suelo podemos diferenciar los espacios protegidos (de cualquier tipo) los cuales en el mapa aparecen como suelo rustico, y los núcleos urbanos (suelo urbano).

A la vista de este mapa, parece más conveniente construir la planta en Gran Canaria ya que la superficie urbanizable es bastante mayor.



Figura 4.5: Clasificación del suelo rústico de Gran Canaria [Elaboración propia]

En la zona Sur de la isla podemos distinguir gran parte de terreno urbanizable y además no hay gran cantidad de núcleos urbanos, por lo que podría ser una buena opción para situar la planta, sin embargo realizando otro análisis de la isla y poniendo como filtro “Red Canaria de reservas de la biosfera” vemos que la gran mayoría de la zona sur de la isla queda descartada.



Figura 4.6: Zona de reservas de la biosfera de Gran Canaria. [Elaboración propia]

Por lo tanto solo nos queda la zona Este de la isla, lo cual es conveniente ya que es la zona donde se encuentra la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria y situar ahí la planta nos permitirá ahorrar costes en el transporte del agua para abastecer a la población. Vamos a seleccionar las diferentes posibles ubicaciones dentro de la superficie urbanizable y que estén cerca de la costa, lo podemos ver más ampliado en la siguiente imagen:



Figura 4.7: Zonas urbanizables cercanas a la costa en Gran Canaria. [Elaboración propia]

Las cuatro zonas son zonas en las que se podría construir la planta desalinizadora, sin embargo podemos descartar las que se encuentran muy cerca de terrenos urbanizados además de que están rodeadas por suelo rústico, como son la 3 y la 4. Por tanto la elección estará entre la 1 y la 2. Podemos verlas más detalladamente en la próxima imagen:



Figura 4.8: Zonas urbanizables 1 y 2. [Elaboración propia]

Observamos que la zona 2 se encuentra rodeada de suelo rústico, lo cual podría causar problemas si se situara la planta desalinizadora en esa zona. Por tanto la mejor elección es la zona 1, que además cuenta con la ventaja de tener parte de costa en el terreno urbanizable, lo cual nos facilitara la extracción de agua salada para nuestra planta. Además, la zona 1 se encuentra próxima a un polígono, lo cual es beneficioso a la hora de conectarse a la red eléctrica, y también supone unos problemas de ruido mínimos. En la Figura 4.8 podemos ver las dimensiones de la zona:

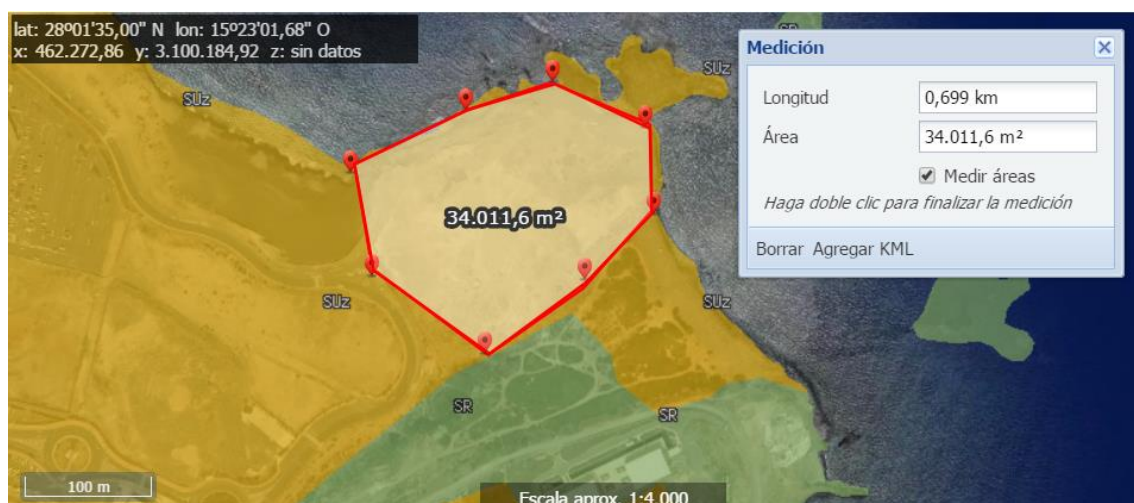


Figura 4.9: Dimensiones de la zona elegida para la planta. [Elaboración propia]



Por lo tanto ya tenemos definida la zona, con un área de 34 m², donde vamos a situar la planta desalinizadora. Aunque no es un área muy grande, por la tecnología elegida tanto de explotación del recurso geotérmico (Sistema binario) tanto como de la tecnología desalinizadora (Osmosis Inversa) el espacio requerido es pequeño comparado con el resto de tecnologías. Además las Islas Canarias son una zona bastante turística, por lo que una gran planta en una zona de costa supondría un gran impacto visual que no favorece a las islas.

4.3 Tecnología de explotación del recurso geotérmico

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos tiene dos aplicaciones, por un lado la generación de electricidad y por el otro el uso directo de calor para zonas residenciales. La posibilidad de aprovechar estos recursos depende de las características del recurso geotérmico y del grado de desarrollo de las tecnologías disponibles.

La mayoría de las plantas de energía convencionales utilizan vapor para generar electricidad. Mientras que las plantas de combustibles fósiles queman carbón, petróleo o gas para hervir el agua, las centrales geotérmicas existentes usan el vapor directamente extraído del recurso geotérmico, o aprovechan el calor del agua extraída para cedérselo a otro fluido y que este mueva la turbina para generar electricidad.

Por lo tanto, las centrales geotérmicas de hoy en día pueden usar agua en la fase de vapor, una combinación de fases de vapor y líquido, o fase líquida solamente. La elección de la planta depende de la profundidad del embalse, y de la temperatura, presión y naturaleza de todo el recurso geotérmico. Todas las formas actuales de desarrollo geotérmico utilizan la reinyección como un medio de explotación sostenible de los recursos. Todos los sistemas utilizan como principio operacional el ciclo Rankine, el cual esta explicado en el *ANEXO II*.

4.3.1 Sondeos geotérmicos

Para poder explotar un recurso geotérmico es necesario realizar estudios previos que puedan verificar la existencia del mismo y además comprobar si tiene características aptas para el uso que se le va a dar. Este es el objetivo de los sondeos geotérmicos.

Estos sondeos en yacimientos geotérmicos se suelen hacer con técnicas muy parecidas a los sondeos que se realizan para extraer petróleo. Primero se verifica su existencia y después se determinan sus características para poder estimar el posible potencial energético de esta fuente. Para poder llevar a cabo esta investigación, es necesario realizar un sondeo de producción que permita extraer el agua o vapor hasta la superficie.

Hay varios tipos de técnicas de sondeos [17], los cuales podemos describir a continuación:

- **Percusión con cable:** Es la técnica más sencilla, la cual se aplica en terrenos duros sobre todo, y consiste en fracturar la roca golpeándola con un útil pesado, elevándolo y dejándolo caer en numerosas ocasiones gracias a un cable de acero del que está colgado. La altura de la caída y su frecuencia dependen de la dureza de las rocas que se quieren fracturar.
- **Perforación a rotopercusión con martillo:** Con la ayuda de un martillo neumático que posee movimiento de rotación y percusión, se envía aire comprimido a alta presión por el interior del mismo, así se permite que los detritos de la perforación asciendan a la superficie.
- **Perforación por rotación:** Es el método más utilizado, el cual utiliza equipos autónomos montados en un camión, permiten realizar sondeos de hasta 5000 m de profundidad. Consiste en utilizar un dispositivo con conos dentados al final de una sarta de perforación para que destruya las rocas mientras a la vez se pueda perforar el pozo. Este es el método elegido para nuestra central geotérmica por su simplicidad y eficacia comparada con los otros métodos.

En todos estos procesos es necesario un fluido para refrigerar la broca de perforación, que suele ser lodo o aire comprimido. Es necesario recalcar que una vez que el fluido geotérmico ha cedido su calor hay que devolverlo al subsuelo en un punto que este alejado del pozo de extracción puesto que es devuelto a menor temperatura que la de captación. Esto se define como doblete geotérmico, que es la combinación del pozo de producción y del pozo de reinyección.

Y una vez definidas las técnicas utilizadas en los sondeos, podemos ver los 3 tipos de sondeos existentes:

- **Sondeos de exploración:** Son sondeos pequeños, se realizan en la exploración del yacimiento, con un diámetro muy pequeño de aproximadamente 60 mm. Son sondeos primarios, sirven para calcular el gradiente de temperatura, características de la roca y verificar las hipótesis iniciales sobre la exploración superficial. Gracias a estos sondeos se puede elegir la zona más adecuada para realizar el yacimiento, por lo que ya se puede empezar con la perforación de los pozos de producción y reinyección.
- **Sondeos de explotación:** En este sondeo se produce la perforación que permite extraer el fluido geotérmico, el diámetro es mayor que en el caso anterior, con un valor de entre 100 y 500 mm, pero la profundidad puede llegar a valores de hasta 6 km. Es en estos sondeos donde se necesitan fluidos para refrigerar la broca.

- Sondeos de reinyección: Se realiza este sondeo para reinyectar el fluido geotérmico cuando este ya ha cedido su calor. Este sondeo no se somete a muchos esfuerzos térmicos ya que la temperatura es menor, por lo que es menos complejo realizar este tipo de sondeos.

4.3.2 Diseños tecnologías de extracción

Los tres principales tipos de plantas geotérmicas [6] son vapor de destello, vapor seco y plantas binarias.

4.3.2.1 Plantas de vapor de destello (*Flash Steam Plants*)

Los recursos geotérmicos que se encuentran más comúnmente contienen fluidos del yacimiento con una mezcla de líquido caliente (agua) y vapores (principalmente vapor de agua). Las plantas de vapor de destello, que componen cerca de dos tercios de la capacidad geotérmica instalada actualmente, se utilizan en yacimientos que tienen temperaturas alrededor de 180 °C.

En estos yacimientos de alta temperatura, el agua puede sufrir una expansión súbita durante su ascenso o mediante el uso de un recipiente de expansión, originando que parte del líquido se evapore inmediatamente. Por eso es necesario utilizar un separador de fases que permita dirigir el vapor (155 °C -165 °C y 0,5 MPa-0,6 MPa) hacia la turbina y el agua no evaporada hacia el acuífero de nuevo. El vapor separado se canaliza a una turbina para generar electricidad y el agua caliente restante puede ser destellado de nuevo dos veces (planta de doble flash) o tres veces (triple flash) a presiones y temperaturas progresivamente más bajas, para obtener más vapor.

En la siguiente figura podemos ver un esquema de una planta de vapor de destello de una etapa:

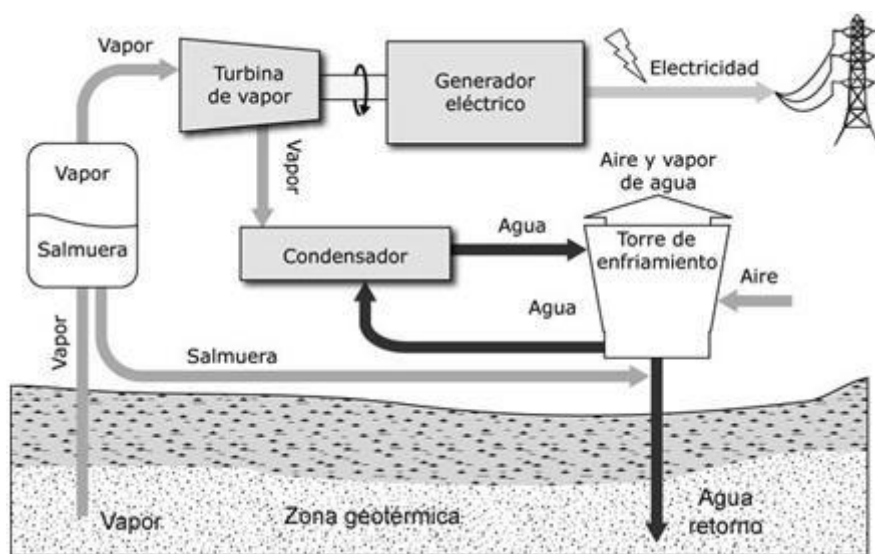


Figura 4.10: Planta de vapor de destello en una etapa [18]

En estos sistemas, el recurso geotérmico llega al separador. Ahí se separan el vapor y la salmuera en un proceso de expansión, y el vapor se dirige a la turbina y la salmuera se reinyecta en el pozo de reinyección. El vapor, una vez ha pasado por la turbina para generar electricidad, se lleva a un condensador donde se convierte en agua líquida saturada. La salmuera enfriada y el condensado son normalmente enviados de vuelta al depósito a través de pozos de inyección. Las plantas de vapor flash de ciclo combinado utilizan el calor de la salmuera geotérmica separada en las plantas binarias para producir energía adicional antes de la reinyección.

El rendimiento de este tipo de plantas es menor al de otro tipo de plantas como las de vapor seco, ya que no toda el agua que llega a la superficie es transformada en vapor de trabajo, como ocurriría en los sistemas Dry Steam.

En el siguiente esquema de la Figura 4.10 podemos ver el diseño de una central de vapor de destello en dos etapas:

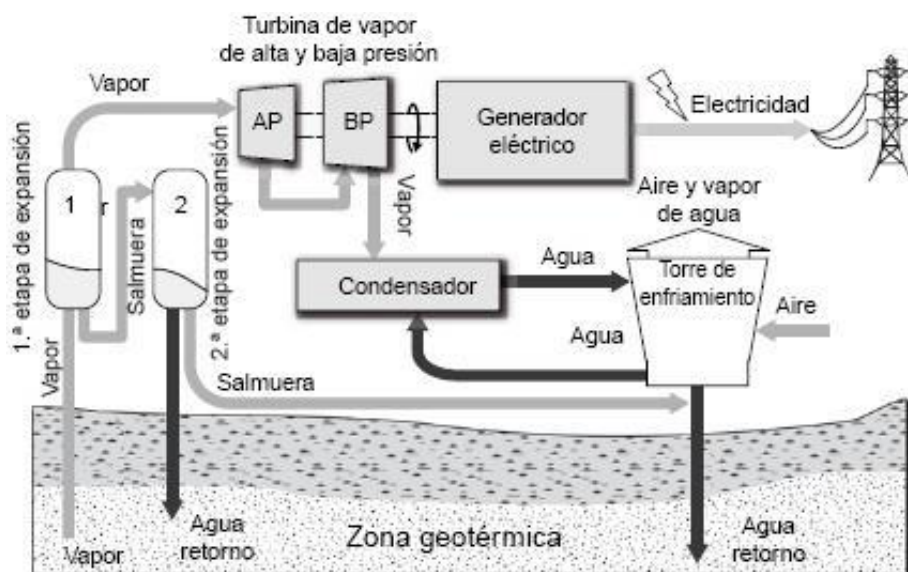


Figura 4.11: Planta de vapor de destello en dos etapas [18]

La principal diferencia de estos sistemas frente a los de una etapa es que existe una turbina de acción que posee dos cuerpos (uno de baja presión y otro de alta presión). En estos sistemas, el vapor que se obtiene de la primera expansión pasa al cuerpo de alta presión de la turbina, mientras que el líquido que se obtiene del primer separador se expande de nuevo, a menor presión que en la primera etapa. El vapor que sale de la segunda etapa de expansión pasa al cuerpo de baja presión de la turbina, y el agua residual se reinyecta en el acuífero. Al igual que en el proceso de una etapa, el vapor una vez sale de la turbina de baja presión se dirige a un condensador donde pasa a agua líquida saturada. El resto es igual que el sistema anterior.

Estos sistemas de expansión en dos etapas se utilizan en yacimientos geotérmicos donde el agua líquida tenga una baja concentración de impurezas. El objetivo de crear este tipo de sistemas es mejorar el rendimiento de las plantas de vapor de destello de una etapa. Hay que destacar que los sistemas de dos etapas aumentan el rendimiento de los sistemas de una etapa en casi un 40%, lo cual los hace muy atractivos a la hora de elegirlos como opción para obtener energía eléctrica. Sin embargo, requieren mucha más cantidad de fluido, para generar la misma potencia que una planta de vapor seco.

4.3.2.2 Plantas de Vapor Seco (Dry Stream Plants)

Las plantas de vapor seco, que hoy representan alrededor de un cuarto de la capacidad geotérmica, utilizan directamente el vapor seco que se canaliza desde los pozos de

producción a la planta. En la siguiente imagen podemos ver un esquema de este tipo de instalaciones de vapor seco:

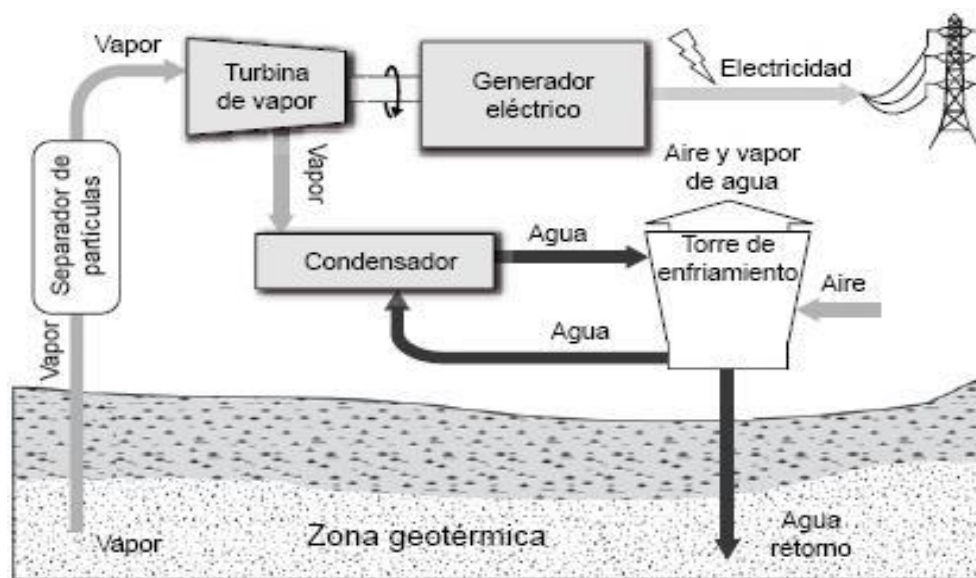


Figura 4.12: Planta de vapor seco [18]

El vapor una vez extraído pasa por un separador de partículas para eliminar impurezas, y como no hay fase líquida pasa directamente por la turbina de expansión donde cede su energía y después se dirige a un condensador donde se convierte en agua líquida saturada. En las plantas de vapor seco, el condensado normalmente se pasa por una torre de enfriamiento, y después una parte importante del agua que se ha enfriado vuelve al condensador para que se pueda volver a utilizar como fluido refrigerante y el resto se inyecta en el acuífero. El control del flujo de vapor para satisfacer las fluctuaciones de la demanda de electricidad es más fácil que en las plantas de vapor de destello, donde se requiere un flujo ascendente continuo en los pozos para evitar el colapso por gravedad de la fase líquida.

El rendimiento termodinámico de estas instalaciones no es muy elevado, si se los compara con los obtenidos para una central térmica convencional. La causa fundamental es la diferencia de presiones a la entrada de la turbina. En una central geotérmica la presión máxima suele ser del orden de 0,9 MPa [6] mientras que en una central convencional dicha presión puede ser de hasta 17,5 MPa, esto es un factor determinante en el rendimiento del ciclo.

4.3.2.3 Plantas binarias (Binary Plants)

Las unidades de generación eléctrica que utilizan ciclos binarios constituyen el grupo de plantas geotérmicas de más rápido crecimiento, ya que son capaces de utilizar recursos de baja a media temperatura, que son más frecuentes en todo el mundo. Los sistemas de ciclo binario pueden ser utilizados en los yacimientos de media entalpía (100 °C - 200 °C), donde predomina el agua líquida. Este tipo de plantas emplean un segundo fluido de trabajo, con un punto de ebullición inferior al del agua (tales como isopentano, isobutano, etc) los cuales se evaporizan gracias al calor del fluido geotérmico y se usan para accionar la turbina del ciclo. Las plantas binarias por tanto suelen utilizar un ciclo de Rankine orgánico (ORC) y operan típicamente con temperaturas que varían desde 73 °C a 180 °C. En la Figura 4.12 se puede ver un esquema de una planta geotérmica binaria:

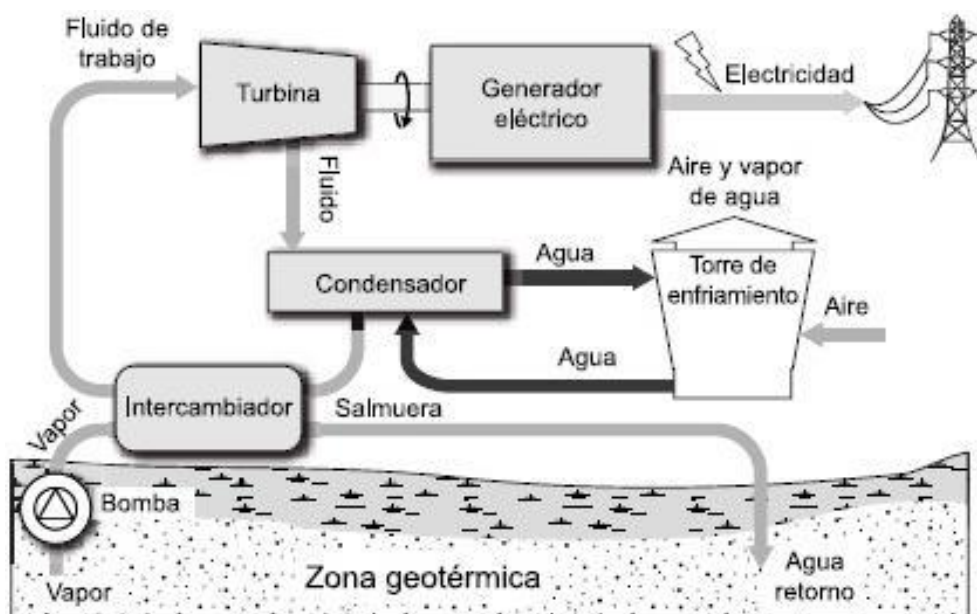


Figura 4.13: Planta binaria [18]

En estas plantas, el fluido geotérmico que se extrae del yacimiento se hace pasar directamente por un intercambiador de calor para vaporizar el fluido orgánico. Por tanto el intercambiador hace la función de un evaporador y el fluido orgánico al ser más volátil que el agua se evapora con más facilidad, y con este fluido ya en fase vapor se impulsa la turbina. El generador que está acoplado a la turbina, es el que genera electricidad. Una vez se ha expandido en la turbina, el fluido pasa por un condensador donde cede calor y vuelve a ser bombeado al evaporador. El condensador es refrigerado con agua gracias a un circuito de refrigeración con el que cuenta. La salmuera geotérmica de temperatura más baja que sale del intercambiador de calor se vuelve a inyectar de



nuevo en el depósito en un circuito cerrado, promoviendo así la explotación sostenible de los recursos.

Además de tener la ventaja de poder utilizar yacimientos geotérmicos de media entalpía, también admiten la explotación de yacimientos con acuíferos que tienen un elevado porcentaje de impurezas.

Hoy en día, las plantas binarias tienen un 11% de participación en la capacidad de generación global instalada [6].

En definitiva, ya se ha visto que los recursos geotérmicos en las Islas Canarias son de media entalpía generalmente, por lo que para asegurar un óptimo rendimiento del ciclo, la opción elegida será en ciclo binario, por su capacidad de generar el mismo trabajo con una fuente de calor más baja. Además esto nos permite tener un cierto rango de incertidumbre en la temperatura del recurso geotérmico, ya que puede ser una temperatura mayor o menor que la supuesta, que el rendimiento obtenido no variará demasiado.

4.4 Tecnología de desalinización

La desalinización es un proceso mediante el cual se elimina la sal del agua del mar, obteniendo agua con la calidad necesaria para el uso que se le vaya a dar. Actualmente existen diversas tecnologías para desalinizar el agua de mar y aunque poseen características distintas de acuerdo con el tipo de energía, diseño y producción que requiere cada una, todas tienen el mismo objetivo, disminuir la concentración de sal del agua del mar. Es decir, hay múltiples procesos para desalar agua y los podemos clasificar en dos grandes grupos: Desalinización térmica y desalinización de membrana.

La desalinización térmica se basa en la evaporación del agua, se forman vapores de agua pura y luego se condensan los mismos en una superficie fría, así se produce agua pura casi libre de sólidos disueltos, mientras que la mayoría de la sal ha sido eliminada al no poder evaporarse.

Los procesos de desalinización de membrana, emplean una barrera física (membrana) que permite el paso de las moléculas de agua, y los sólidos disueltos no atraviesan la membrana, lo cual permite obtener agua con una concentración muy baja en sal.

Los procesos de desalinización tienen distintos requerimientos de energía en función del proceso que utilicen. Los procesos de desalinización térmica requieren grandes cantidades de energía térmica y eléctrica para llevar a cabo el proceso de evaporación de agua pura, para el transporte del flujo hidráulico del proceso y transporte del agua producida. En cambio los procesos de desalinización de membrana requieren energía eléctrica de alta calidad para poder suministrar energía mecánica sobre la membrana

para causar la separación, y también para el pretratamiento, bombeo y distribución del agua fuera de la planta.

En la siguiente tabla podemos ver un resumen de los procesos de desalinización tratados en este proyecto:

TIPO DE SEPARACIÓN	PROCESO	TECNOLOGÍA
SEPARACIÓN DEL AGUA DE LAS SALES	Evaporación	Evaporación multiefecto de tubos horizontales (MED)
		Evaporación multiefecto de tubos verticales (VTE)
		Evaporación súbita multietapa (MSF)
		Compresión mecánica de vapor (VC)
		Compresión térmica de vapor (VCT)
		Destilación solar
		Destilación de tubos sumergidos
	Cristalización	Congelación
	Filtración	Formación de hidratos
		Osmosis inversa (OI)
SEPARACIÓN DE LAS SALES DEL AGUA	Micro filtración (MF), Ultrafiltración (UF) y Nanofiltración (NF)	
	Intercambio iónico	Intercambio iónico
	Filtración selectiva	Electrodialisis (ED)
	Disolución	Extracción con disolventes

Tabla 4.1: Tipos de procesos de desalinización

Todos estos procesos de desalinización están definidos con más detalle en el *ANEXO I*.

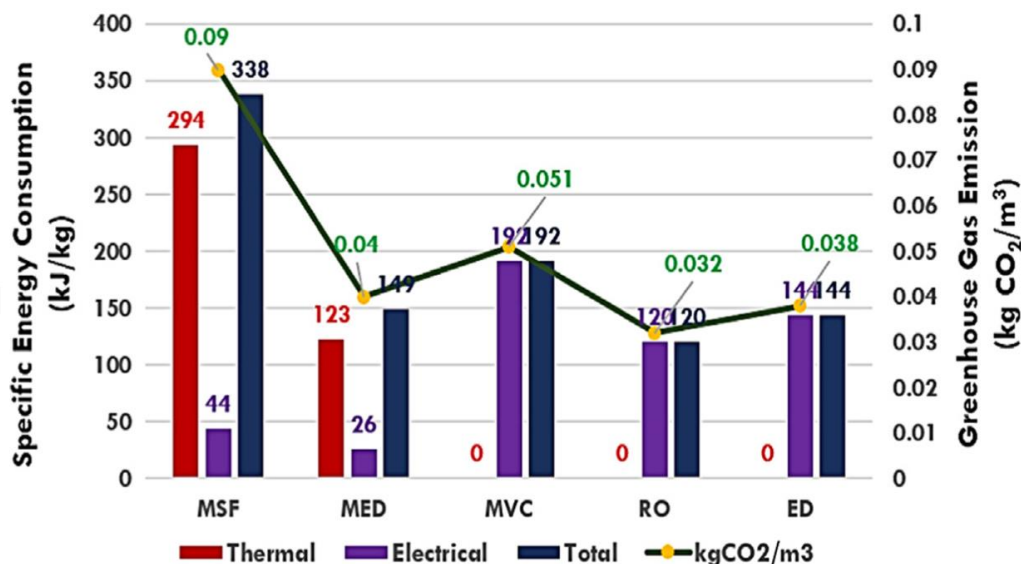
Además, en la Tabla 4.2 podemos ver un resumen de los tipos de desalinización en función de sus características, las cuales nos van a ayudar a elegir el proceso óptimo para esta planta:

Características	MSF	MED	CV	OI	ED
Tecnología	Evaporación	Evaporación	Evaporación	Membranas	Membranas
Tipo energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético(kJ/kg)	Alto(>800)	Alto-Medio	Alto	Medio(<80)	Medio
Coste instalación	Alto	Alto-Medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad de producción	Alta	Media	Baja	Alta	Media
Temperatura máxima del proceso	90-120 °C	70-75 °C	70-75 °C	<45 °C	<45 °C
Calidad del agua desalada	Alta	Alta	Alta	Media-Alta	Media
Sensibilidad a condiciones del agua de mar	Media	Reducida	Reducida	Alta	-
Pretratamiento	Moderado	Simple	Simple	Exigente	Exigente
Corrosión	Alta	Media	Media-Alta	Baja	Media

Tabla 4.2: Características de los procesos de desalinización

El principal criterio a la hora de elegir el tipo de desalinización va a ser el consumo energético del proceso, ya que un ciclo operado con energía geotérmica no proporciona una potencia tan elevada como puede producir otro tipo de central térmica, que opera con temperaturas mucho más elevadas y el trabajo que produce es mucho mayor. Con las limitaciones de energía que tenemos, elegir una técnica con un consumo específico bajo es la mejor opción. Pero también hay que tener en cuenta, a la hora de elegir el proceso de desalinización, el tipo de fuente de energía que vamos a utilizar. Cada fuente de energía renovable deberá integrarse con un proceso desalinizador que aproveche de manera más eficiente la energía disponible.

En la siguiente grafica podemos ver la energía específica consumida (KJ de energía consumida para producir un kilogramo de agua dulce) además de los kg de CO₂ emitidos por m³ de agua desalada:



Grafica 4.1: Energía específica consumida por kg de agua dulce y kilogramos de CO₂ emitidos por m³ [5]

Se puede observar que la desalinización por Evaporación en Varias Etapas (Multi-Stage Flash) es el proceso que más energía específica consume, mientras que la Osmosis Inversa (Reverse Osmosis) tiene el consumo más bajo, además las emisiones de CO₂ también son las más bajas en comparación con los otros procesos, por lo que es el proceso más sostenible. Es por esto que la Osmosis Inversa es el método de desalinización más utilizado.

Es importante saber que los procesos de desalinización térmicos son preferiblemente utilizados cuando se trata de aguas con una gran cantidad de sólidos disueltos, ya que esto dificultaría mucho el pretratamiento de la Osmosis Inversa, porque saturaría la membrana y la desalinización no tendría el efecto deseado.

Al tratarse de una planta desalinizadora con objeto de producir agua potable que sea apta para el consumo humano, su capacidad de producción debe ser elevada, por lo que descartamos la mayoría de las técnicas excepto MSF y OI. Al comparar entre estas dos técnicas podemos observar varias cosas:

- El consumo de energía es mucho mayor en la MSF que en OI.
- La OI requiere un tratamiento previo y un tratamiento posterior, pero puesto que el agua está destinada para el consumo humano esto sería necesario en la mayoría de los métodos, además de que el agua producida por OI es apta para la producción de agua potable.
- La MSF requiere mayor atención, además que tiene más tendencia a sufrir corrosión.

Por tanto, la técnica que es más conveniente en este caso es la Osmosis Inversa, ya que es muy importante minimizar el consumo energético en este tipo de centrales, además que necesita una menor atención y la probabilidad de corrosión o deterioro es mucho menor. Otra ventaja que no ha sido comentada con anterioridad es que la OI requiere



mucho menos espacio que MSF, por lo que definitivamente es la técnica ideal para este proyecto.



CAPÍTULO 5: CASO DE ESTUDIO



En este capítulo el objetivo es definir la tecnología elegida para la central, así como elegir los parámetros que van a hacer que la planta tenga un rendimiento aceptable. Para ello se elegirá un fluido de trabajo apropiado, teniendo en cuenta el potencial y características de cada uno para elegir cual es el más conveniente para la central y para el medioambiente. Se elegirá la configuración del ciclo más apropiada en función de lo que estamos buscando que es obtener una potencia adecuada para abastecer el sistema de Osmosis Inversa a bajo coste y se calcularán los parámetros característicos del ciclo, tales como potencia neta y rendimiento. Se presentaran los resultados globales de la central y se hará un balance cualitativo de la misma.

5.1 Diseño de la planta

El ciclo básico de operación de nuestra planta es el ciclo Rankine. Este ciclo es un ciclo de potencia, es decir, que utiliza un fluido de trabajo (cualquier fluido que sea capaz de evaporarse y condensarse, generalmente se utiliza agua) para generar trabajo a partir de calor. Su funcionamiento consiste en, calentar el fluido de trabajo en una caldera hasta evaporarlo, para después hacerlo pasar por una turbina donde el fluido pierde presión y produce energía cinética que mueve los alabes, generando el trabajo mecánico. Posteriormente, el vapor pasa a un condensador donde vuelve a estado líquido, y luego pasa a través de una bomba que lo vuelve a enviar a la caldera. Podemos ver con más detalle las características del ciclo Rankine en el *ANEXO II*.

Existen tres alternativas de extracción del recurso geotérmico (Vapor de destello, vapor seco y ciclo binario) como ya hemos visto anteriormente, pero también es posible realizar una combinación de estas, con el objetivo de aumentar el rendimiento de la central.

Como ya hemos visto antes, los sistemas Flash Steam son más favorables para los recursos de temperaturas más altas, mientras que los sistemas binarios son adecuados para recursos de más baja temperatura. Los sistemas Dry Steam quedan descartados ya que su uso está restringido a yacimientos donde el fluido extraído sea vapor en su totalidad, lo cual es muy complicado e imposible de saber sin realizar un sondeo previo.

Para elegir la configuración más eficiente y económica del ciclo, estudiaremos todas las alterativas en el siguiente apartado.

5.1.1 Elección del fluido de trabajo

Entre los recursos de energía geotérmica, los de baja y media temperatura dominados por el agua son los más abundantes disponibles en el mundo. Para explotar estos

recursos, las centrales eléctricas binarias son los mejores sistemas de conversión de energía, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental [19].

Los ciclos Rankine Orgánicos (ORC) son una de las opciones más efectivas para extraer energía de yacimientos geotérmicos de media temperatura. Estos sistemas emplean un fluido de trabajo orgánico secundario dentro de un ciclo de Rankine cerrado denominado ciclo Rankine orgánico.

El ciclo de Rankine Orgánico simple consiste en cuatro componentes principales; evaporador (generalmente es una caldera, pero puede ser sustituido por cualquier elemento donde se absorba calor), turbina, condensador y bomba, como podemos ver en la Figura 5.1. En el ORC simple, el fluido de trabajo orgánico que pasa a través del evaporador y absorbe la energía térmica de la salmuera geotérmica. El fluido de trabajo se expande en la turbina para producir potencia y después se enfría y se condensa en el condensador antes de ser bombeado de nuevo al evaporador. En la siguiente figura podemos ver un esquema de este ciclo:

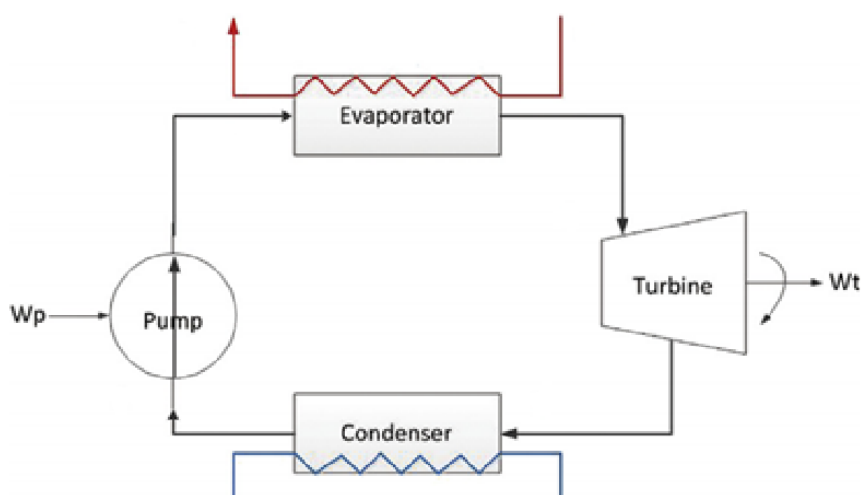


Figura 5.1: Ciclo Rankine simple [21]

Cabe destacar un nuevo sistema binario, el ciclo de Kalina [21], que utiliza una mezcla de agua-amoníaco como fluido de trabajo, se desarrolló en los años noventa. El fluido de trabajo se expande, en condiciones de sobrecalentamiento, a través de la turbina de alta presión y luego se vuelve a calentar antes de entrar en la turbina de baja presión. Después de la segunda expansión, el vapor saturado se mueve a través de una caldera recuperativa antes de condensarse en un condensador refrigerado por agua. El ciclo de Kalina es más eficiente que las actuales centrales eléctricas binarias ORC geotérmicas, pero es de diseño más complejo, por eso aunque nos proporcionaría un mayor rendimiento vamos a descartar este diseño por su complejidad y su mayor precio.

Los recursos geotérmicos de alta calidad producen vapor seco o una mezcla de vapor de agua a temperaturas de más de 450 K. En nuestro caso, las fuentes de mediana y baja calidad con temperaturas por debajo de 450 K deben utilizar una planta de energía binaria como los sistemas ORC para mejorar su eficiencia. En la siguiente imagen podemos ver un esquema de un ciclo Rankine Orgánico con fuente de calor geotérmica:

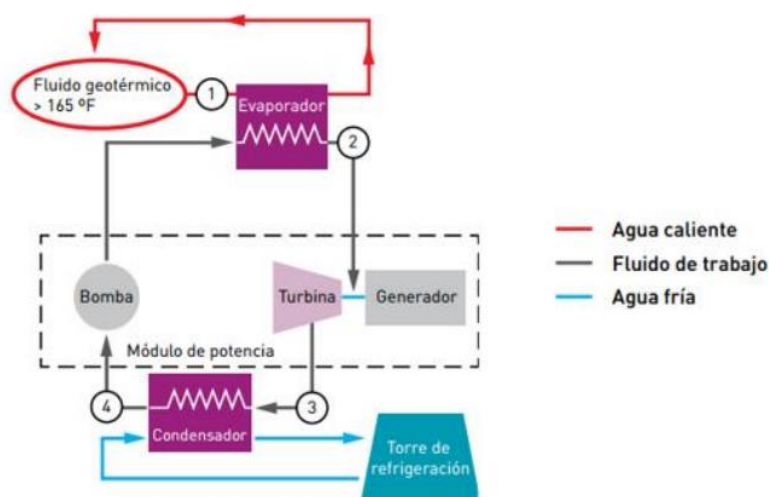


Figura 5.2: Ciclo ORC con fuente de calor geotérmica [2]

El fluido geotérmico de mediana temperatura (próxima a los 150 °C) cede calor en el evaporador al fluido orgánico, y después se reinyecta en el pozo de inyección. El fluido orgánico pasa a la turbina donde se expande, y gracias al movimiento de los alabes de esta el generador transforma esa energía mecánica en energía eléctrica. Al salir de la turbina, el fluido pasa por un condensador donde se enfría gracias al sistema de refrigeración, y posteriormente pasa por la bomba que lo lleva de nuevo al evaporador para repetir el ciclo.

Los ORC tienen un alto rendimiento, tanto rendimiento térmico como eficiencia exergética y dan una potencia neta alta. Dado que en la zona que vamos a situar la planta desalinizadora no sabemos exactamente la temperatura a la que vamos a extraer el fluido de trabajo la mejor opción es un ciclo binario, como ya se vio anteriormente, ya que no necesitamos una temperatura del fluido extraído muy elevada. Las características de los ORC quedan definidas más detalladamente en el *ANEXO III*.

Para analizar estos sistemas se hacen los siguientes supuestos:

- Los sistemas operan en estado estacionario.
- Se desprecian los cambios en las energías cinética y potencial.
- Las bombas y las turbinas funcionan adiabáticamente y se suponen isoentrópicas.
- Las pérdidas de presión través de los intercambiadores de calor y en las tuberías se desprecian.



- Se considera un reservorio dominado por agua para el campo geotérmico y se asume el estado líquido saturado de la salmuera geotérmica.

Hay varias opiniones sobre los mejores fluidos de trabajo y criterios de evaluación para fuentes geotérmicas. Además de los fluidos de trabajo, la turbina es también una parte importante de los sistemas ORC. Como se ha comprobado, hay múltiples opciones a la hora de elegir una configuración y un fluido de trabajo que optimicen el ciclo, pero en realidad, cada sistema ORC tiene sus propios requisitos de fluido de trabajo, especialmente para sistemas de ORC geotérmica de media y baja temperatura.

Para elegir un fluido de trabajo, vamos a realizar un análisis de las propiedades de distintos fluidos de trabajo para ver cómo afectan dichas propiedades al rendimiento del sistema. El agua geotérmica, al ser bombeada desde las profundidades del suelo consume trabajo, por tanto la eficiencia de utilización de la fuente de calor es muy importante para los sistemas geotérmicos ORC. Por lo tanto el objetivo es maximizar la producción de trabajo para poder bombear el agua geotérmica.

5.1.1.2 Comparativa de distintos fluidos de trabajo

En cuanto a los fluidos de trabajo ORC, estudios previos han indicado que los fluidos de trabajo buenos tienen las siguientes características [21]:

- Alto calor específico y latente.
- Elevadas densidades tanto en fase líquida como en fase gaseosa.
- Temperatura y presión críticas moderadas.
- Presiones moderadas de evaporación y condensación.
- Excelente transporte y propiedades de transferencia de calor (como baja viscosidad y alta conductividad térmica).
- Seguridad y estabilidad química.
- Capacidad material y ninguna corrosión.
- Disponibilidad y coste del mercado.
- Ambientalmente benigno (ODP cero y bajo GWP).

Estas características están definidas con más detalle en el *ANEXO III*.

Con el fin de mejorar el rendimiento del sistema ORC, los factores que influyen en el rendimiento del sistema se deben determinar en primer lugar. También hay que analizar las influencias de las propiedades del fluido en el rendimiento de los dos ciclos.

Para ello, vamos a estudiar el comportamiento de varios fluidos de trabajo, de los cuales tenemos datos [22] recogidos en la siguiente tabla:



Fluido	Clasificación según diagrama T-s	Tª crítica (°C)	Presión de condensación (bar)
R11	Isoentrópico	198	1,734
R12	Isoentrópico	112	9,6
R13	Húmedo	28,86	-
R113	Seco	214,1	0,7808
R114	Seco	145,7	3,369
R134a	Isoentrópico	101	10,17
R245fa	Seco	154	2,496
R1234yf	Isoentrópico	94,7	10,18
R1234ze	Isoentrópico	109,4	7,673
R13B1	Húmedo	67	22,79
R14	Húmedo	-45,65	-
R141b	Isoentrópico	204,2	1,329
R142b	Isoentrópico	137,1	5,216
R143a	Húmedo	72,7	17,1
R22	Húmedo	96,13	15,34
R23	Húmedo	23,13	-
R236fa	Seco	124,9	4,375
R290	Isoentrópico	96,68	13,69
R32	Húmedo	78,11	24,78
R41	Húmedo	44,13	53,64
R410A	Húmedo	72,13	24,16
R423A	Isoentrópico	99,52	9,306
R500	Isoentrópico	105,5	11,35
R600	Seco	152	3,792
FC72	Seco	175,4	0,5636
FC87	Seco	147,9	1,477
Acetona	Isoentrópico	236	0,5653
Ammonia	Húmedo	132,3	15,55
Benceno	Seco	288,9	0,2439
Ciclohexano	Seco	280,5	0,2463
Etanol	Húmedo	240,8	0,1789
Isobutano	Seco	134,7	5,309
Isopentano	Seco	187,2	1,513
Metanol	Húmedo	240,2	0,347
n-Butano	Seco	152	3,792
n-Decano	Seco	344,6	0,004869
n-Heptano	Seco	267	0,1232
n-Pentano	Seco	195,5	1,163
Dióxido de azufre	Seco	157,5	6,299
Tolueno	Seco	318,6	0,07907

Tabla 5.1: Propiedades de fluidos orgánicos [22]

Para descartar algunos fluidos, vamos a establecer unos límites termodinámicos tales como:

- Con respecto a la clasificación de los fluidos según el diagrama T-s, los fluidos más adecuados para trabajar son los fluidos secos e isoentrópicos, por lo que descartamos los húmedos.
- La temperatura del punto crítico tiene que ser superior a 90 °C, porque si esta fuera muy baja no podríamos utilizar el fluido con esta fuente de calor.
- La presión de condensación de los fluidos no puede ser inferior a la atmosférica, es decir, a 1 bar, porque si no se produciría una entrada de aire del exterior en el condensador. Para que no se produzca esto, la temperatura del fluido a la salida de este no debe ser inferior a 40 °C.

Una vez establecidos estos límites, podemos descartar fluidos de la tabla anterior, por lo que solo nos quedarían los fluidos recogidos en la siguiente tabla. Además vamos a restringir estos fluidos, eligiendo solo los que son beneficiosos para el medio ambiente, en función de dos parámetros: potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y potencial de calentamiento global (GWP). El ODP debe ser 0, y el GWP debe ser bajo.

Fluido	ODP	GWP
R11	1	4000
R114	0,8	8000
R134a	0	1300
R245fa	0	820
R1234yf	0	4
R1234ze	0	6
R141b	0,11	630
R142b	0,06	2000
R22	0,06	1700
R236fa	0	6300
R290	0	20
R423a	0	2280
R500	0,74	6010
R600	0	3
FC87	0	5000
Isobutano	0	20
Isopentano	0	11
n-Butano	0	3

Tabla 5.2: ODP y GWP de los fluidos orgánicos [23][24]

Por lo tanto, el listado de refrigerantes posibles se reduciría a: R134a, R245fa, R1234yf, R1234ze, R290, R423a, R600, Isobutano, Isopentano y n-Butano.

Por último, vamos a realizar una última clasificación para determinar los fluidos aptos para nuestro ciclo. En esta clasificación los separaremos en inflamables y no inflamables. Podemos ver la clasificación en la siguiente tabla, donde descartaremos los fluidos inflamables:

Fluido	Inflamabilidad
R134a	No inflamable
R245fa	No inflamable
R1234yf	Inflamable
R1234ze	Inflamable
R290	Inflamable
R423a	No inflamable
R600	Inflamable
Isopentano	Inflamable
n-Pentano	Inflamable

Tabla 5.3: Inflamabilidad de los fluidos orgánicos [24]

Por tanto, el listado de refrigerantes ya se reduce a únicamente 3 fluidos: R134a, R245fa y R423a.

Finalmente, descartamos un último refrigerante, el R423a, ya que es el que posee una temperatura crítica menor, lo cual limita en cierto modo la temperatura del agua geotérmica (fuente de calor) y como este es un valor supuesto pero desconocido, no podemos arriesgar a que la temperatura del fluido orgánico supere su temperatura crítica.

Para poder realizar la comparativa entre estos fluidos, primero vamos a plantear las ecuaciones que vamos a utilizar en esta simulación de ciclo Rankine orgánico simple e ideal:

- Turbina:

$$W_T = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2)$$

Donde W_T es la potencia proporcionada por la turbina [kW], \dot{m} es el flujo másico del fluido orgánico [kg/s] y h_1 y h_2 son las entalpías a la entrada y a la salida de la turbina [kJ/kg].

- Condensador:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$$



Donde Q_{cond} es el calor cedido en el condensador [kW], \dot{m} es el flujo másico del fluido orgánico [kg/s] y h_2 y h_3 son las entalpías a la entrada y a la salida del condensador [kJ/kg].

- Bomba:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3)$$

Donde W_b es la potencia consumida por la turbina [kW], \dot{m} es el flujo másico del fluido orgánico [kg/s] y h_3 y h_4 son las entalpías a la entrada y a la salida de la bomba [kJ/kg].

- Evaporador:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$$

Donde Q_{evap} es el calor absorbido en el evaporador [kW], \dot{m} es el flujo másico del fluido orgánico [kg/s] y h_4 y h_1 son las entalpías a la entrada y a la salida del evaporador [kJ/kg].

Además de estas fórmulas de cada uno de los elementos del ciclo, utilizaremos la fórmula del rendimiento de un ciclo:

$$\eta = \frac{W_{obt}}{Q_{abs}} = \frac{W_T - W_b}{Q_{evap}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

Con estas fórmulas y con el análisis cualitativo realizado anteriormente de las características de los fluidos orgánicos elegiremos la mejor opción para conseguir un máximo aprovechamiento de la energía en el ciclo ORC.

Utilizando MATLAB y la librería de fluidos CoolProp podemos calcular todos los parámetros definidos anteriormente para cada fluido de trabajo.

Para poder realizar la elección del fluido de trabajo, hay que establecer unos valores de diseño predeterminados [21, 25, 26] para poder diseñar el ciclo al completo, estos valores son:

- El caudal de agua geotérmica será de 20.000 kg/h.(5,55 kg/s)
- Las condiciones de esta fuente calor externa (agua geotérmica) serán: La temperatura de entrada en el evaporador es de 140 °C y la presión de 5 bares.
- La bomba y la turbina se consideran ideales para esta primera simulación del ciclo Rankine para simplificar los cálculos.
- La temperatura del fluido orgánico a la salida del evaporador es un valor que hay que definir, pero que está limitado por la temperatura crítica del refrigerante. Por ello, vamos a definir un valor máximo de la temperatura a la salida del



evaporador (T_1) y un valor mínimo en función de la temperatura crítica de tal forma:

- Para temperatura crítica $T_c > 160\text{ °C}$: $T_1=150\text{ °C}$
- Para $100\text{ °C} < \text{temperatura crítica } T_c < 150\text{ °C}$: $T_1=T_c-10\text{ °C}$
- Para $90\text{ °C} < \text{temperatura crítica } T_c < 100\text{ °C}$: $T_1=90\text{ °C}$

Además para poder compararlos es necesario también definir algunas restricciones, tales como:

- El estado del fluido de trabajo en la salida de la turbina tiene que ser vapor sobrecalentado.
- La presión mínima admisible a la salida de la turbina será de 5 kPa.
- El rango de temperatura del agua de refrigeración se establece entre 25 y 35 °C.
- La pérdida de calor en los intercambiadores de calor y las tuberías se considera despreciable.
- No hay caída de presión en el evaporador ni en el condensador.

Una vez definidas las restricciones y datos de partida, vamos a calcular el trabajo neto, el rendimiento y el calor absorbido en el evaporador para ambos refrigerantes. Los cálculos realizados están definidos con más detalle en el ANEXO IV. Los resultados son los siguientes:

Fluido	Trabajo neto (kW)	Calor absorbido en evaporador (kW)	Rendimiento	Titulo vapor salida turbina
R134a	42,99	234,76	0,18312	0,968
R245fa	37,71	227,33	0,16580	1

Tabla 5.4: Resultados del ciclo Rankine ideal con R134a y R245fa.

El refrigerante R134a proporciona un rendimiento ligeramente superior al R245fa, además de un mayor trabajo neto y absorbe más calor en el evaporador, sin embargo, el título de vapor en la salida de la turbina es inferior a 1, lo cual significa que a la salida de la turbina se forman gotas de agua, las cuales pueden impactar contra los alabes de la turbina produciendo el deterioro de estos. Por ese motivo, y principalmente porque el R245fa tiene un GWP bastante inferior al R134a, ya que son bastante similares en resultados con la ventaja de que el título de vapor a la salida de la turbina es 1 para el R245fa, el R245fa es el fluido de trabajo elegido, ya que el R134a al tener un Potencial de Calentamiento Global potencialmente alto, es posible que sea prohibido en unos años.

5.1.2 Elección de la configuración del ciclo

Una vez elegido el fluido de trabajo, podemos elegir la configuración que optimice los parámetros del ciclo. Hay una gran variedad de configuraciones del ciclo Rankine orgánicos, y en contraste con las centrales de vapor convencionales, para la mayoría de los fluidos orgánicos la expansión en la turbina termina en fase de vapor por encima de la temperatura del condensador en lugar de la región de dos fases, lo cual es una ventaja.

Por lo tanto, para mejorar el rendimiento del ORC simple (S-ORC), se puede emplear un Intercambiador de Calor Interno (IHE) para recuperar parte del contenido energético de la corriente de salida de la turbina. Esta configuración se denomina ORC-IHE. Otra alternativa para mejorar el rendimiento del ORC simple es extraer una fracción del fluido de trabajo entre las etapas de la turbina para el calentamiento de la alimentación antes del evaporador, esto se conoce como Ciclo Rankine Orgánico Regenerador (R-ORC).

Vamos a estudiar todas estas alternativas, las cuales podemos ver en las siguientes figuras:

- Ciclo ORC simple:

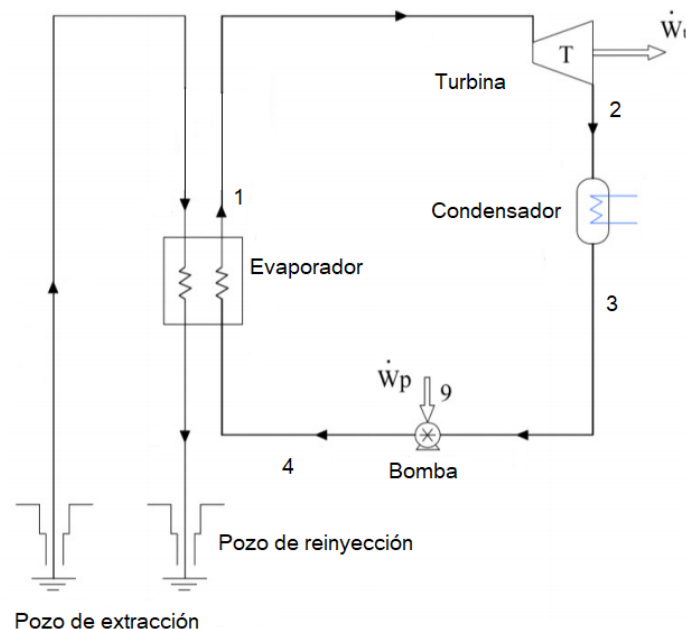


Figura 5.2: Ciclo ORC simple [19]

- Ciclo ORC con IHE:

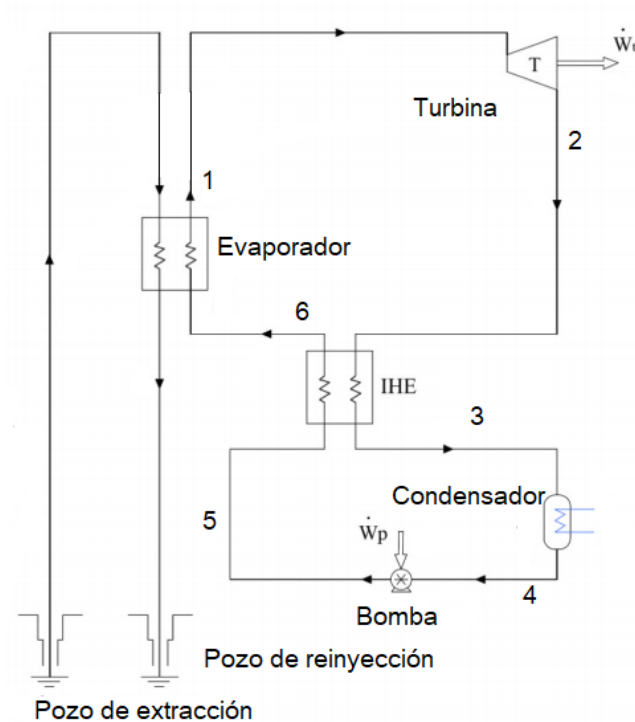


Figura 5.3: Ciclo ORC con IHE [19]

- Ciclo ORC con regeneración:

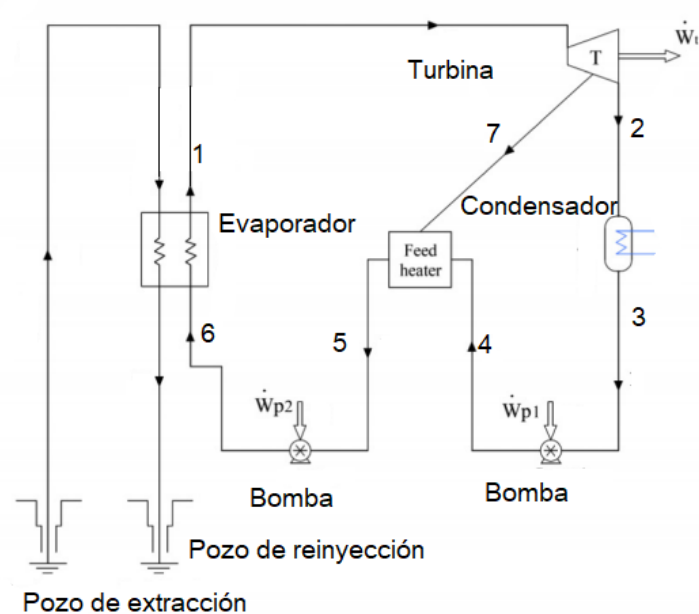


Figura 5.4: Ciclo ORC con Regeneración [19]

Se van a realizar los cálculos de los ciclos ORC con IHE y ORC con Regeneración, los cuales están detallados en el *ANEXO V*, y cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Ciclo	Trabajo neto (kW)	Calor absorbido en el evaporador (kW)	Rendimiento
S-ORC	37,61	227,33	0,1658
IHE-ORC	37,61	218,3	0,1720
R-ORC	37,43	167,89	0,2222

Tabla 5.5: Resultados del ciclo ORC para las diferentes configuraciones.

Después de una comparación entre los sistemas investigados, en las condiciones de operación, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El ciclo ORC simple tiene el valor más alto de potencia de salida neta.
- El ciclo R-ORC proporciona el rendimiento más alto.

Aunque el sistema con regeneración es el que más rendimiento proporciona, hay que tener en cuenta que el ORC simple tiene el valor más bajo del coste total del proyecto, además supone una menor inversión de capital total y el período de amortización es más corto. Estos son los factores que han llevado a la elección de la configuración S-ORC como configuración final, ya que hay que tener en cuenta que la energía geotérmica de media temperatura produce mucha menos energía que otras renovables como la biomasa o la solar, por lo que un ciclo simple nos proporciona una mayor eficiencia debido a su simplicidad. La tecnología ORC es una tecnología poco desarrollada hasta el momento, por lo que la elección de un ciclo simple asegura tener un rendimiento considerable, sin sobre costes añadidos como puede ser un intercambiador de calor interno.

Por tanto la configuración elegida será un ciclo ORC simple, por su simplicidad, coste y menor inversión, aunque es cierto que con las otras configuraciones conseguiríamos un rendimiento un poco mayor, con un ciclo ORC simple disminuye en gran medida la complejidad del ciclo y sale más rentable económicamente.

5.1.3 Elementos del ciclo

5.1.3.1 Turbina

La turbina es el elemento fundamental del ciclo Rankine. Se define como una turbomáquina, a través de la cual pasa un fluido de forma continua [27]. Ese fluido, en fase vapor, que además se encuentra a una alta presión y temperatura, entra en la turbina y se expande mientras se produce el choque del mismo con los alabes de la turbina, los cuales transmiten su energía mecánica a la turbina, produciendo un movimiento rotatorio. El generador eléctrico que se encuentra acoplado mecánicamente a la turbina aprovecha este movimiento y transforma dicha energía mecánica en energía eléctrica.

Las turbinas de los ciclos Rankine orgánicos trabajan con fluido orgánico en vez de agua, y estos procesos suelen ser utilizados para la producción de energía sobre todo en biomasa, aplicaciones geotérmicas o residuos industriales. Para los ORC, las turbinas [28] utilizadas se caracterizan por:

- Estar diseñadas para recuperar energía bajo condiciones hidráulicas variables en mini centrales.
- Facilitan el aprovechamiento de recursos existentes y hasta ahora desperdiciados.
- Permiten el ahorro de costes del ciclo integral del agua.
- Tienen la capacidad de proporcionar energía a zonas sin conexión a red, lo cual las hace muy útiles en zonas remotas y alejadas de núcleos urbanos.
- Tienen un bajo coste de mantenimiento.

En resumen, estas turbinas que operan con fluidos de trabajo orgánicos en vez de con agua, proporcionan rendimientos altos para cargas parciales y potencias bajas. Esto las hace muy atractivas para aplicaciones como la biomasa y la energía geotérmica. La instalación de equipos de alta eficiencia energética es muy importante, pero la eficiencia de manera sostenible es una prioridad indispensable.

La turbina elegida en nuestro caso es la turbina ORC ORCHID de Enertime [29]. Dicha turbina está adaptada para la expansión de fluidos densos bajo presión. Tiene una gran resistencia y excelente rendimiento, las turbinas axiales son muy adecuadas para la producción de energía a partir de la expansión de un vapor o un fluido orgánico. La podemos ver en la Figura 5.5:



Figura 5.5: Turbina ORC ORCHID de Enertime [29]

Las características de esta turbina son:

- Tipo de turbina: axial
- Número de etapas: multietapa
- Naturaleza de flujo: subsónico, excelente rendimiento, incluso en carga parcial
- Velocidad: 1.500 RPM y 4000 RPM, dependiendo del proyecto
- Rodamientos: rodamientos o cojinete hidrodinámico
- Sellado dinámico: sí (pongase en contacto para más detalles)
- Lubricación: forzada, con aceite (sistema de lubricación diseñado y suministrado por Enertime)
- Acoplamiento: directamente o por medio de una caja de cambios
- Potencia: 300 kWe a 3000 kWe standard.

Figura 5.6: Características de la turbina ORCHID [29]

5.1.3.2 Condensador

El condensador es el elemento del ciclo ORC que se encarga de condensar el vapor que sale de la turbina. Está formado por superficies de transferencia de calor donde un fluido frío cede calor al vapor de la salida de la turbina, convirtiéndolo en líquido condensado.

Existen varios tipos de condensadores, los cuales podemos agrupar en dos grupos: refrigerador por agua y refrigerados por aire. Los condensadores refrigerados por aire logran absorber el calor forzando grandes cantidades de aire fresco gracias a un ventilador, pero en este caso no vamos a darle importancia a este tipo ya que nuestro ciclo está refrigerado por agua de mar, aprovechando la cercanía a la costa de la planta desalinizadora. Además, son utilizados solo en casos excepcionales, ya que es más fácil intercambiar calor con agua que con aire, por lo que el condensador tendría un tamaño más grande. Los condensadores enfriados por aire se usan ampliamente con plantas binarias donde el agua puede ser escasa, ya que las plantas binarias no suministran su

propia agua de reposición, sin embargo ocupan grandes extensiones de tierra debido a las pobres propiedades de transferencia de calor del aire frente al agua.

Los condensadores enfriados por agua son los condensadores más utilizados, donde la refrigeración se realiza gracias a una corriente de agua a baja temperatura, donde absorbe el calor del refrigerante y lo condensa, y después sale a una temperatura más elevada. En la siguiente imagen podemos ver un esquema de este tipo de condensadores:

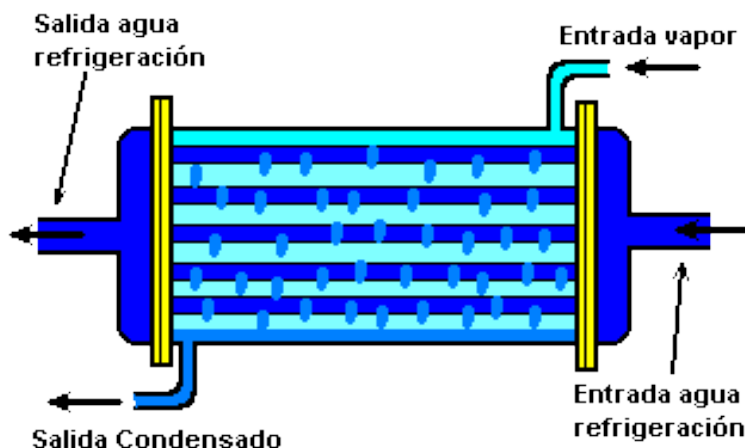


Figura 5.7: Condensador enfriado por agua [30]

El condensador elegido para este ciclo es un condensador de LAPESA, es un intercambiador de placas con referencia LPIC-12, podemos ver las características de este en la siguiente figura:

INTERCAMBIADORES DE PLACAS COMPACTOS		Ref.	Nº de placas	Caudal (l/h) 50°C	Potencia (kW) ⁽³⁾	Pérdidas de carga m.c.a.	A x B x F	E	C	D	Conexiones
Temperatura máx. de trabajo	135 / 155°C ⁽¹⁾	LPIC-01	20	1.000	45	< 3	73 x 192 x 42,32	20,1	40	154	3/4"
Presión máx. de trabajo	16 / 25 bar ⁽²⁾	LPIC-02	20	2.000	90	< 6	73 x 315 x 42,32	20,1	40	278	3/4"
Aplicaciones	Líquido/Líquido	LPIC-03	20	3.000	140	< 6	119 x 289 x 48,8	45	72	243	1"
Chasis	AISI 316	LPIC-04	30	4.000	185	< 6	119 x 289 x 71,2	45	72	243	1"
Placas	AISI 316	LPIC-05	40	5.000	235	< 6	119 x 289 x 93,6	45	72	243	1"
Conexiones	AISI 316	LPIC-07	40	7.000	325	< 8	119 x 376 x 93,6	45	63	320	1-1/4"
Complemento	Aislamiento térmico	LPIC-10	60	10.000	465	< 8	119 x 376 x 136,4	45	63	320	1-1/4"
		LPIC-12	70	12.000	560	< 8	119 x 376 x 160,8	45	63	320	1-1/4"

(1) La temperatura máxima de trabajo para los modelos LPIC-01 y LPIC-02 es de 135°C, para el resto de 155°C.

(2) La presión máxima de trabajo para los modelos LPIC-01 a LPIC-05 es de 16 bar, para el resto de 25 bar.

(3) Potencia definida según: Primario 90/60°C y secundario 10/50°C.

Opcional: otras presiones, temperaturas o fluidos.

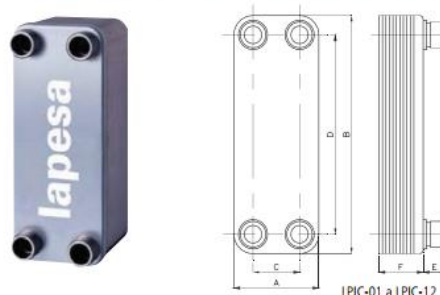


Figura 5.8: Características del Condensador LAPESA [31]

5.1.3.3 Bomba

Son las encargadas de enviar el fluido condensador al evaporador, mediante una compresión de la fase líquida, lo cual implica un consumo de potencia, que es mínimo comparado con el trabajo que proporciona la turbina. La bomba se encarga de aumentar la presión del fluido desde la presión del condensador hasta la presión de alta. Es necesario que el fluido de trabajo se encuentre en fase de líquido subenfriado y no presentar mezcla de líquido y vapor.

La bomba elegida para la extracción del fluido geotérmico es una bomba de SULZER, ideal para extraer del subsuelo el recurso geotérmico de media entalpía. Las características de la bomba se presentan en la siguiente figura:

	SJT Geo
Caudales	Hasta 680 m ³ /h/3.000 galones USA por minuto
Alturas	Hasta 700 m/2.300 pies
Presiones	Hasta 100 bares/1.450 libras por pulgada cuadrada
Temperaturas	Hasta 220 °C/428 °F

Figura 5.9: Características bomba de extracción SULZER [32]

Y para la bomba de alimentación del refrigerante se va a elegir otra bomba de la misma marca SULZER, y podemos ver sus características en la siguiente figura:

	SJD-API
Caudales	Hasta 3.800 m ³ /h/20.000 galones USA por minuto
Alturas	Hasta 700 m/3.000 pies
Presiones	Hasta 75 bares/ 1.100 libras por pulgada cuadrada
Temperaturas	Hasta 205 °C/400 °F

Figura 5.10: Características bomba de alimentación SULZER [33]

5.1.3.4 Evaporador

Un evaporador es un intercambiador de calor, al igual que el condensador, en cambio en este intercambiador es un fluido caliente el que cede calor al refrigerante para que este se evapore. En el evaporador el fluido pasa de estado líquido a gaseoso a presión constante.

Dentro de los evaporadores [34], se distinguen según el tipo de aplicación del calor, donde se diferencian los calentados a fuego directo, los que son calentados mediante

paredes y los calentados mediante agua o vapor mediante tubos. En este caso, la fuente de calor es agua geotérmica a una temperatura media alta, por lo que se usará un evaporador tubular.

Los evaporadores tubulares se pueden clasificar en horizontales o verticales:

- Evaporadores tubulares horizontales: Son más simples, tienen una instalación más fácil, pero no son adecuados para líquidos viscosos. Son poco usados a nivel industrial.
- Evaporadores tubulares verticales: Son más complejos, pueden tener tubos largos o cortos. Los tubos cortos tienen fácil mantenimiento, y presentan altos coeficientes de transferencia de calor, sin embargo si la diferencia de temperatura es baja los coeficientes de transferencia son bajos. Los tubos largos son más baratos, tienen buenos coeficientes de transferencia de calor pero para evaporaciones significativas es necesario recircular.

Por tanto la elección para el ciclo es un Evaporador tubular vertical de tubos cortos. El Intercambiador elegido es un intercambiador de la marca PROINCAR [35]. Podemos ver las características del mismo en las siguientes figuras:



Figura 5.11: Evaporador PROINCAR [35]

Tipo: Tubo-Placa**Disposición:** Vertical**Datos de diseño:**

EQUIPO	PRESIÓN DE DISEÑO (kgf/cm ²)		TEMPERATURA DE DISEÑO (°C)	
	Shell Side	Tube Side	Shell Side	Tube Side
Dry Gas Heat Exchanger	17.34	8.16	540	250
Primary Heat Exchanger	10.20	12.24	65	150

Nº de Tubos / Dimensiones / Material:

ITEM	Nº Tubes	Dimensions	Material
Dry Gas Heat Exchanger	132	Ø60.3" x 2.77mm Thk x 12,380 mm long.	SA-213 TP 321
Primary Heat Exchanger	164	Ø60.3" x 2.77mm Thk x 4,631 mm long.	SA-213 TP 321

Figura 5.12: Características del evaporador PROINCAR [35]

5.1.3.5 Torre de refrigeración

Las torres de refrigeración son estructuras cuya finalidad es reducir la temperatura del agua. Esta agua necesita ser refrigerada ya que previamente ha sido calentada en un intercambiador de calor, por lo que para mantener la eficiencia del ciclo se necesita eliminar este calor residual.

Hay varios tipos de torres de refrigeración, las cuales se pueden clasificar según distintos métodos:

Según el fluido de refrigeración:

- Refrigerado por agua: Son torres conocidas como torres húmedas. Al utilizar el agua como refrigerante estas plantas tienen múltiples ventajas ya que el agua tiene muy buenas propiedades, es abundante y además es barata.
- Refrigerado por aire: Son torres con un tamaño mayor que las torres refrigeradas por agua, y se utilizan cuando no es posible utilizar el agua como refrigerante. Se realiza la refrigeración a través de superficies planas o tubos aleteados.

Según la impulsión del aire:

- Tiro natural: El aire se impulsa sin necesidad de ninguna fuerza externa, simplemente por diferencia de densidades.
- Tiro forzado: El aire se impulsa gracias a un ventilador en la parte inferior de la torre.
- Tiro asistido: El aire se impulsa gracias a un ventilador en la parte superior de la torre.



Figura 5.13: Torre de refrigeración [36]

5.2 Resultados

Una vez definida la configuración del ciclo, el fluido de trabajo que va a utilizar y los componentes del ciclo, se procede a calcular los parámetros que definen el ciclo ORC.

Las ecuaciones empleadas para el modelo definitivo serán las mismas que las utilizadas anteriormente, con algunas modificaciones, ya que hay que añadir el rendimiento isentrópico de la bomba y la turbina, así como un flujo másico del fluido de trabajo acorde con el calor que queramos extraer del fluido geotérmico.

Al igual que en la selección del fluido de trabajo, vamos a preestablecer unos parámetros para poder calcular el trabajo del ciclo así como el calor absorbido y cedido y el rendimiento total del ciclo.

En la siguiente tabla podemos ver datos de partida con los que vamos a trabajar:

Parámetro	Valor
Rendimiento isentrópico de la bomba	85%
Rendimiento isentrópico de la turbina	90%
Temperatura de entrada del agua geotérmica	140 °C
Temperatura de salida del agua geotérmica	35 °C
Flujo másico de agua geotérmica	20.000 kg/h = 5,55 kg/s
Presión de alta del ciclo	30 bar
Presión de baja del ciclo	3 bar
Temperatura de salida del evaporador del R245fa	144 °C

Tabla 5.6: Datos de partida del ciclo

Y se utilizarán las fórmulas de cada componente, las cuales ya están definidas anteriormente y se resumen en la siguiente tabla:

Componente	Fórmula
Turbina	$W_T = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2)$
Condensador	$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$
Bomba	$W_b = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3)$
Evaporador	$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$

Tabla 5.7: Fórmulas de la potencia de los componentes del ciclo

Además hay que definir los rendimientos isoentrópicos en función de las entalpías:

- Rendimiento isoentrópico de la bomba:

$$\eta_{iso,b} = \frac{(h_{4s} - h_3)}{(h_4 - h_3)}$$

- Rendimiento isoentrópico de la turbina:

$$\eta_{iso,t} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})}$$

Una vez definidos los rendimientos, y teniendo las fórmulas para calcular el trabajo y el calor del evaporador y del condensador a través de Matlab y con la biblioteca de fluidos Coolprop procedemos al cálculo de las entalpías al igual que se hizo en el ANEXO IV, teniendo en cuenta que los valores obtenidos de las entalpías h_{2s} y h_{4s} son los valores isoentrópicos, y para obtener los valores reales utilizaremos las fórmulas del rendimiento isoentrópico de la bomba y la turbina. De forma detallada, se calcularán los valores punto por punto con los datos de partida:

- Punto 1: Salida del evaporador y entrada a la turbina

Datos de partida	Entalpía	Entropía	Título de vapor
$P_1=30 \cdot 10^5$ Pa	$h_1=490,68$ kJ/kg	$s_1=1,7993$ kJ/kg·K	$x_1=1$
$T_1= 417,15$ K			

Tabla 5.8: Parámetros que definen el punto 1 del ciclo

- Punto 2s: Salida de la turbina y entrada al condensador (Ideal)

Datos de partida	Entalpía	Temperatura	Título de vapor
$P_{2s}=3 \cdot 10^5$ Pa	$h_{2s}=450,30$ kJ/kg	$T_{2s}=329,83$ K	$x_{2s}=1$
$S_{2s}=1,7993$			

Tabla 5.9: Parámetros que definen el punto 2s del ciclo

- Punto 2: Salida de la turbina y entrada al condensador (Real)

$$\eta_{iso,t} = 0,90 = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} = \frac{490,68 - h_2}{490,68 - 450,30}$$

$$h_2 = 453,66 \text{ kJ/kg}$$

Datos de partida	Entropía	Temperatura	Título de vapor
P₂=3·10⁵ Pa	s ₂ =1,8094 kJ/kg·K	T ₂ =333,26 K	x ₂ =1
h₂=453,66 kJ/kg			

Tabla 5.10: Parámetros que definen el punto 2 del ciclo

- Punto 3: Salida del condensador y entrada a la bomba

Datos de partida	Entalpía	Entropía	Temperatura
P₃=3·10⁵ Pa	h ₃ = 260,65 kJ/kg	s ₃ =1,2049 kJ/kg·K	T ₃ =318,72 K
x₃=0			

Tabla 5.11: Parámetros que definen el punto 3 del ciclo

- Punto 4s: Salida de la bomba y entrada al evaporador (Ideal)

Datos de partida	Entalpía	Temperatura	Título de vapor
P_{4s}=30·10⁵ Pa	h _{4s} =262,77 kJ/kg	T _{4s} =319,84 K	x _{4s} =0
S_{4s}=1,2049			

Tabla 5.12: Parámetros que definen el punto 4s del ciclo

- Punto 4: Salida de la bomba y entrada al evaporador (Real)

$$\eta_{iso,b} = 0,85 = \frac{(h_{4s} - h_3)}{(h_4 - h_3)} = \frac{262,77 - 260,65}{h_4 - 260,65}$$

$$h_4 = 263,14 \text{ kJ/kg}$$

Datos de partida	Entropía	Temperatura	Título de vapor
P₄=30·10⁵ Pa	s ₄ =1,2061 kJ/kg·K	T ₄ =320,12 K	x ₄ =0
h₄=263,14 kJ/kg			

Tabla 5.13: Parámetros que definen el punto 4 del ciclo

Una vez tenemos los valores de las entalpías en todos los puntos, falta calcular el flujo másico de refrigerante, con los datos de partida iniciales podemos calcularlo a partir del calor cedido por el agua geotérmica al refrigerante, definido en la siguiente fórmula:



$$Q_{evap} = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot (T_{ent} - T_{sal}) = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$5,55 \cdot 1 \cdot (140 - 35) = \dot{m} \cdot (490,68 - 263,14)$$

$$\dot{m} = 2,56 \text{ kg/s}$$

Y teniendo el flujo másico, ya se puede calcular el trabajo producido en la turbina, el trabajo consumido por la bomba, el calor suministrado en el evaporador y el calor cedido en el condensador:

- Trabajo obtenido en la turbina:

$$W_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 2,56 \cdot (490,68 - 453,66) = 94,77 \text{ kW}$$

- Calor cedido en el condensador:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 2,56 \cdot (453,66 - 260,65) = 494,10 \text{ kW}$$

- Trabajo consumido por la bomba:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) = 2,56 \cdot (263,14 - 260,65) = 6,37 \text{ kW}$$

- Calor absorbido en el evaporador:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = 2,56 \cdot (490,68 - 263,14) = 582,5 \text{ kW}$$

Y a partir de estos valores obtenemos el rendimiento total del ciclo:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{sum}} = \frac{W_t - W_b}{Q_{evap}} = \frac{94,77 - 6,37}{582,5} = \frac{88,4}{582,5} = 0,151$$

Es decir, nuestro ciclo tiene un rendimiento del 15,1%.

Este rendimiento es un rendimiento bueno ya que los rendimientos de los ciclos ORC suelen variar en torno al 16% [37].

Una vez calculado el trabajo y rendimiento del ciclo, es necesario saber que parte de dicho trabajo se destinará a bombear el agua desde el yacimiento geotérmico y que otra parte podrá ser destinada a la desalinización. Para ello vamos a calcular la potencia consumida por la bomba, ya que conocemos el flujo másico de agua geotérmica, el poder calorífico, y suponemos que el agua en su trayecto desde el pozo al evaporador disminuye aproximadamente 5 °C:

$$W_{B,geo} = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot (T_{pozo} - T_{ent,evap}) = 5,55 \cdot 1 \cdot 5 = 27,75 \text{ kW}$$

Por lo tanto, la energía que se podrá dedicar a la desalinización será:

$$W_{desal} = W_{neto} - W_{B,geo} = 88,4 - 27,75 = 60,65 \text{ kW}$$

En la siguiente tabla podemos ver un resumen de los resultados obtenidos de nuestro ciclo ORC:

Parámetro	Valor
Trabajo neto	88,4 kW
Calor absorbido en el evaporador	582,5 kW
Calor cedido en el condensador	494,1 kW
Rendimiento	15,1 %
Trabajo consumido por la bomba geotérmica	27,75 kW
Trabajo destinado a la desalinización	60,65 kW

Tabla 5.13: Resultados finales del ORC

Por tanto, la energía eléctrica destinada a la desalinización se puede calcular como:

$$E_{elect}[kWh/año] = P_{neta}[kW] \cdot N_{dias}[Días/año] \cdot H[h/día]$$

$$E_{elect} = 60,65 \cdot 365 \cdot 24 = 531.294 \text{ kWh/año}$$

La desalación por Osmosis Inversa actualmente consume entre 4 y 6 kWh por m³ de agua desalada en el caso de que sea agua salada, y entre 0,5 y 2,5 kWh por m³ en el caso de que sea agua salobre [5]. Por tanto, sabiendo que el agua del Océano Atlántico posee una salinidad de 12 g/L (para que el agua sea considerada salobre su salinidad debe variar entre 5 y 50 g/L [38]) se va a interpolar para obtener el consumo de la desalinizadora en el caso del Océano Atlántico:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{2,5 - 0,5}{50 - 5} = \frac{y - 0,5}{12 - 5}$$

$$y = 0,811 \frac{kWh}{m^3 \text{ de agua}}$$

Por tanto, considerando que para desalar el agua del Océano Atlántico vamos a consumir 0,811 kWh por m³ de agua, podemos calcular cuántos litros de agua se podrían desalar con la energía generada por el ciclo ORC:

$$\frac{531.294 \text{ kWh/año}}{0,811 \text{ kWh/m}^3} = 655.109,74 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Producción \text{ real anual de agua} = 200 \frac{m^3}{día} \cdot 365 \frac{días}{año} = 73.000 \frac{m^3}{año}$$

Por tanto, la energía eléctrica anual que consume el proceso de desalinización es:

$$E_{Desalinización} = 73.000 \frac{m^3}{año} \cdot 0,811 \frac{KWh}{m^3} = 59.203 \frac{kWh}{año}$$

La energía generada por el ciclo ORC es suficiente para abastecer el sistema de desalación por Osmosis Inversa, y la energía sobrante será utilizada para el autoabastecimiento de la planta.

En la siguiente figura podemos ver un esquema final de la planta, con los datos de cada punto del ciclo ORC:

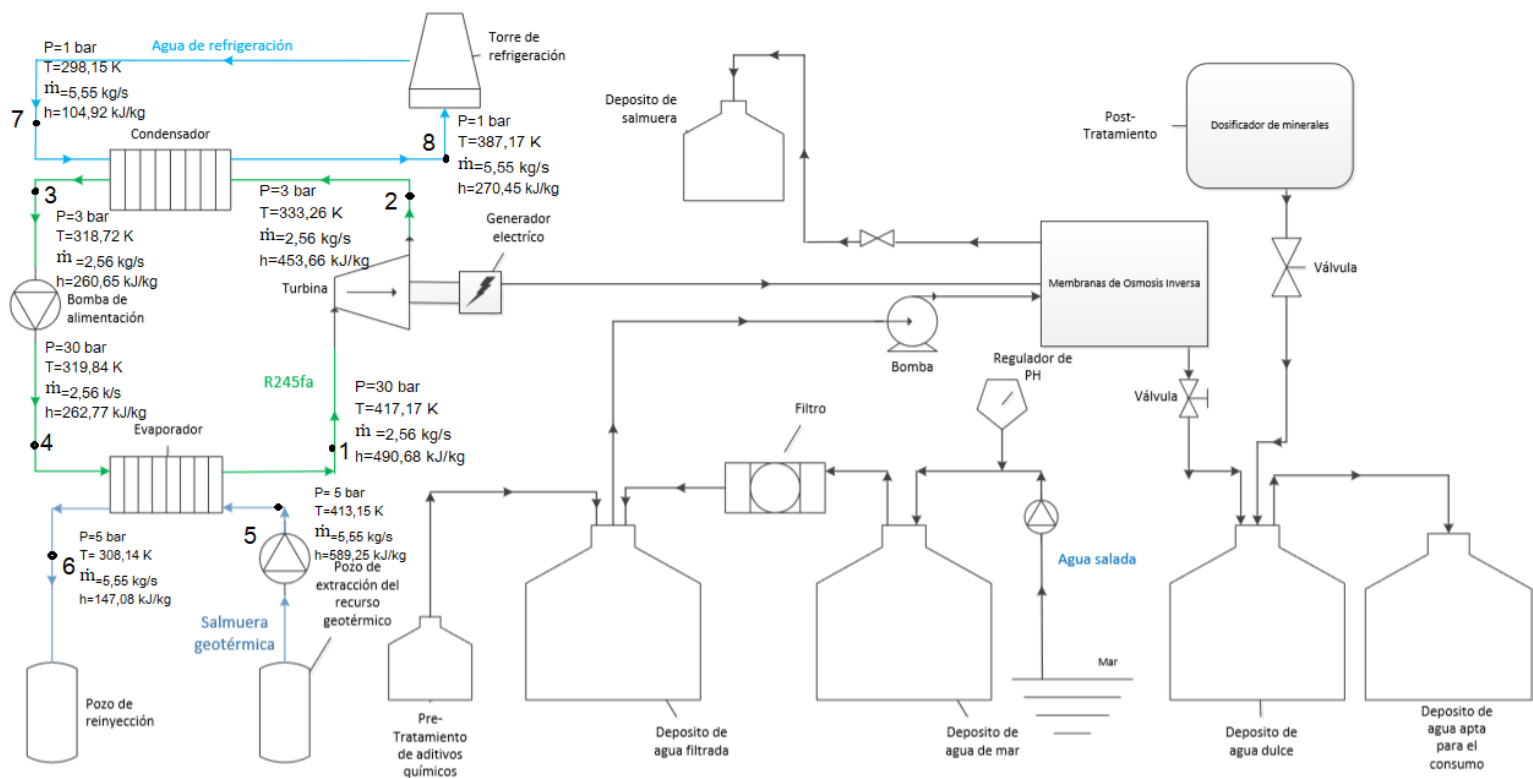


Figura 5.15: Esquema final de la planta [Elaboración propia]



CAPÍTULO 6: IMPACTO AMBIENTAL

Hoy en día, cualquier tipo de planta que genere electricidad tiene una larga lista de posibles impactos ambientales. Todos los cambios ambientales nombrados en la siguiente lista se aplican a todas las plantas de energía, pero es cierto que en las plantas geotérmicas tienen grados variables y considerablemente más bajos. Los posibles impactos ambientales [39] son:

- Emisiones gaseosas a la atmosfera
- Contaminación del agua
- Emisiones de sólidos a la superficie
- Contaminación acústica
- Uso del suelo
- Uso de agua
- Alteración de las manifestaciones hidrotermales naturales
- Alteración de las vistas naturales

Todos estos son posibles impactos de gran preocupación para las plantas geotérmicas, aunque en comparación con otro tipo de plantas productoras de energía las plantas geotérmicas presentan ventajas muy significativas para la mayoría de estos impactos. Las centrales geotérmicas son especialmente benignas en las áreas de emisiones atmosféricas, uso del suelo, uso del agua, contaminación del agua y emisiones de sólidos. Además hay tecnología de reducción de estos posibles impactos disponible y es desplegada para reducir los impactos más dañinos, tales como la reducción del ruido, para preservar las características del entorno.

6.1 Ventajas medioambientales de las centrales geotérmicas

Hay gran preocupación en todo el mundo por las emisiones atmosféricas de dióxido de carbono, CO₂, debido a sus propiedades de atrapamiento de calor y el temor de su efecto sobre el clima global. Las centrales geotérmicas tienen emisiones gaseosas muy bajas en comparación con todas las demás tecnologías de generación de energía que emiten CO₂ como parte normal de la operación. Las plantas binarias geotérmicas normalmente no emiten gases en absoluto.

Comparando con otras centrales, las plantas geotérmicas ocupan bastante menos terreno que las demás plantas de energía. En general los fluidos geotérmicos utilizados en las centrales eléctricas son inocuos y representan poco peligro en lo que se refiere a la contaminación de sólidos. La reinyección de las salmueras de desecho de las plantas geotérmicas evita la contaminación de los acuíferos de superficie y de aguas subterráneas. Por lo tanto, tomadas en el ámbito amplio, las plantas de energía geotérmica son una de las fuentes más ambientalmente benigna de energía eléctrica.

6.1.1 Emisiones gaseosas a la atmosfera

Las emisiones gaseosas procedentes de las centrales geotérmicas de vapor seco y de vapor instantáneo provienen de los gases no condensables (NCG) que se transportan en el geofluido en forma disuelta. El NCG se acumulará en el condensador, elevando de este modo la contrapresión en la turbina y esto puede provocar una reducción significativa en la potencia de la turbina. Por esta razón, los NCG se eliminan del condensador por algunos medios (por ejemplo, eyectores de chorro de vapor, bombas de vacío, turbocompresores).

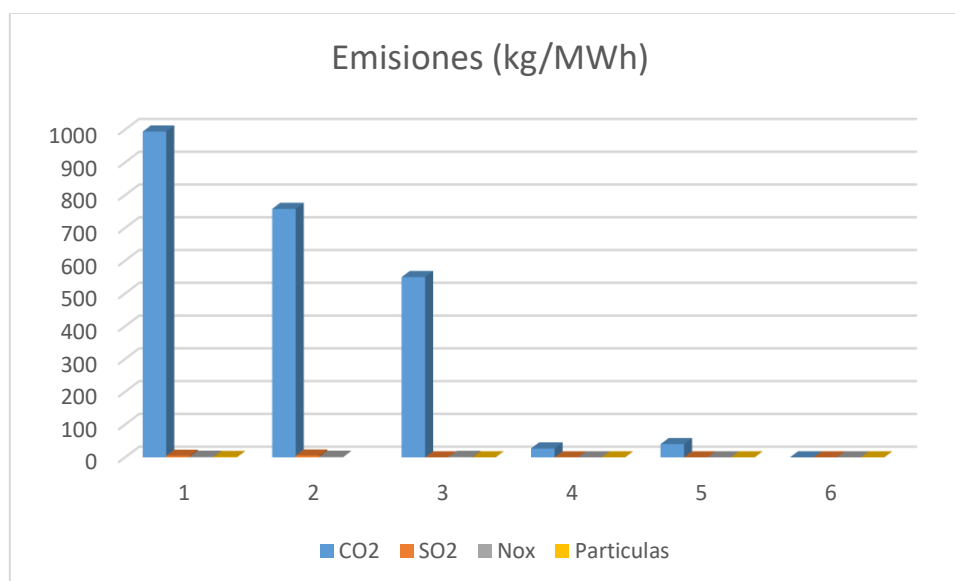
El dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno, el H_2S , son los NCG más comunes y prominentes en el vapor geotérmico, pero también se pueden encontrar gases como el metano, el hidrógeno, el dióxido de azufre o el amoníaco, generalmente en concentraciones muy bajas. En el caso de las plantas binarias, donde la salmuera se produce en la fase líquida con el NCG todavía en solución, el NCG permanece en solución a lo largo de los procesos de transferencia de calor y regresa al depósito con la salmuera residual durante la reinyección, por lo que en este sentido las plantas binarias son las más beneficiosas.

En la siguiente tabla podemos ver las emisiones de gases contaminantes por MWh producido de varias centrales:

Tipo de planta	CO ₂ (kg/MWh)	SO ₂ (kg/MWh)	NO _x (kg/MWh)	Partículas (kg/MWh)
1.Planta de vapor a carbón	994	4,71	1,955	1,012
2.Planta de vapor a combustible	758	5,44	1,814	No disponible
3.Turbina de gas	550	0,0998	1,343	0k,0635
4.Planta de vapor instantáneo	27,2	0,1588	0	0
5.Planta de vapor seco	40,3	0,000098	0,0000458	Despreciable
6.Planta binaria	0	0	0	Despreciable

Tabla 6.1: Emisiones gaseosas de varias centrales térmicas [39]

Y aquí podemos ver una gráfica en la que se comparan dichos valores:



Grafica 6.1: Emisiones gaseosas de varias centrales térmicas

Como ya se ha dicho y se puede observar en la gráfica anterior, la planta binaria es la mejor opción en lo que a emisiones de gases contaminantes se refiere ya que las emisiones son nulas o despreciables. Además, las emisiones producidas por la desalinización son también despreciables ya que la Osmosis Inversa es el proceso menos desfavorable para el medioambiente.

En definitiva, utilizar una fuente de energía renovable para satisfacer la demanda creciente de energía eléctrica es una muy buena opción para reducir los gases contaminantes que se emiten a la atmosfera, y por lo tanto disminuyen el efecto invernadero.

6.1.2 Uso del suelo

El área requerida para soportar una planta geotérmica, incluyendo el campo de pozo, subestación, vías de acceso y edificios auxiliares, depende de la clasificación de la planta, el tipo de sistema de conversión de energía, las propiedades del fluido del depósito geotérmico y el sistema de tuberías elegido para recoger el geofluido de los pozos de producción y disponer de la salmuera residual a los pozos de inyección.

La central eléctrica debe ser construida cerca de los pozos de producción para evitar las pérdidas termodinámicas causadas por tuberías geofluidas largas. Además la perforación direccional permite perforar múltiples pozos y minimiza el área necesaria.

Es interesante destacar que una planta geotérmica flash o binaria requiere (por MW) el 5% de la superficie necesaria para una central solar térmica y el 2% para una planta solar



fotovoltaica ubicada en la mejor zona de insolación. Por lo que la ventaja que las plantas geotérmicas tienen sobre las alternativas es sorprendente.

6.1.3 Emisión de sólidos

Los sólidos que podrían ser descargados al medio ambiente de las plantas geotérmicas están confinados a materiales que inicialmente se disuelven en el geofluido y que precipitan durante los procesos experimentados dentro de la central eléctrica. Los dos métodos para hacer frente a estas salmueras de alta salinidad son los sistemas Flash Crystallizer / Reactor-Clarifier (FCRC) y Modificación del pH (pH-mod).

El método más utilizado es el FCRC que es un método avanzado para convertir el líquido sobrecalentado geotérmico en vapor mientras se eliminan los sólidos. El proceso ayuda a lograr ganancias térmicas y recuperar minerales de manera efectiva. El sistema de manejo de la salmuera en la planta evita la acumulación de minerales, por lo que minimiza la corrosión. Este método limpia la salmuera y permite que se reinyecte sin la posibilidad de precipitación de sólidos dentro del depósito donde podría afectar negativamente a la permeabilidad de la formación.

6.1.4 Uso del agua

El agua se necesita en cada etapa del desarrollo de un proyecto geotérmico. Esto no es diferente de cualquier otro gran proyecto de desarrollo de energía. Sin embargo, las necesidades de proyectos geotérmicos son relativamente fáciles de satisfacer. Además, el uso del agua puede ser manejado en la mayoría de los casos para minimizar los impactos ambientales. Las dos áreas principales de uso del agua son la perforación de pozos y la descarga de calor residual si se utiliza una torre de enfriamiento de agua.

El agua requerida durante esta fase de desarrollo enfría la broca, elimina las virutas de roca y proporciona la integridad estructural del agujero hasta que se puede fijar la envoltura. Por lo tanto, se necesita una cantidad muy pequeña de agua dulce para compensar las pérdidas por evaporación durante el enfriamiento. Por lo general esto puede ser proporcionado por el agua superficial local de estanques, arroyos o pozos poco profundos.

Con respecto a la descarga de calor residual, el método habitual de descarga de este calor en plantas de vapor geotérmico, flash o binarias es el uso de torres de refrigeración de agua. Además, tales plantas proporcionan sus propios requerimientos de agua de reposición para las torres de enfriamiento puesto que el condensado de vapor es suficiente para cubrir la pérdida por evaporación de agua de la torre. Sin embargo, existe una necesidad de cantidades relativamente pequeñas de agua dulce para la purga para evitar una acumulación de sólidos en el pozo frío de la torre de enfriamiento.



6.1.5 Contaminación del agua

Hay varios lugares donde los geofluidos pueden entrar en el ambiente durante el desarrollo del campo o las operaciones normales. Dado que estos fluidos pueden contener minerales y elementos dañinos para los seres humanos, la flora o la fauna, incumbe a los diseñadores de plantas crear barreras para evitar que estos fluidos entren en la biosfera.

La cantidad de sólidos disueltos aumenta significativamente con la temperatura, haciendo que los geofluidos de alta temperatura tengan más riesgo que los de temperatura moderada o baja. Algunos de estos minerales disueltos (por ejemplo, boro y arsénico) podrían envenenar el agua superficial o subterránea y también dañar la vegetación o los animales. La cubierta del pozo es la primera barrera contra la contaminación de las aguas subterráneas. Por lo tanto, se tiene especial cuidado en instalar y cementar múltiples carcassas a poca profundidad para proporcionar barreras adicionales. Se realizan registros de cemento (pruebas de integridad) para asegurar al perforador que no hay puntos ciegos detrás de la carcasa que podrían romperse bajo estrés térmico causado por la apertura y el cierre repetidos del pozo.

Por lo tanto, los fluidos que se descargan durante las pruebas se dirigen a estanques de retención impermeables. Posteriormente los fluidos recogidos se reinyectan profundamente bajo tierra. A pesar de todas estas precauciones de diseño, es importante controlar la salinidad de la salmuera que se inyecta en los pozos de reinyección para evitar la contaminación del ecosistema, y la salinidad del agua que se devuelve al mar después de realizar el proceso de desalinización, por no dañar el ecosistema marino.



CAPÍTULO 7: ESTUDIO ECONÓMICO

Para estudiar la viabilidad económica de dicha propuesta, se va a realizar un presupuesto estimado del proyecto y después se analizará el impacto socio-económico del mismo.

7.1 Presupuesto

7.1.1 Costes de la fase de construcción

En esta fase se considera la inversión inicial del proyecto, un coste que engloba la obra, los equipos e instalaciones en lo que a la planta desalinizadora se refiere. Basándonos en los datos que proporciona Sadyt [40] y ESMAP [41] podemos estimar los precios relativos a la extracción de energía geotérmica, los costes iniciales se centran en inspecciones topográficas iniciales, desarrollo del campo, perforaciones de prueba... además de los elementos del ciclo.

Área	Concepto	Coste(€)	Periodo de amortización (años)	Amortización (€/año)
Desalinizadora	Obra	2.000.000	20	100.000
	Instalaciones	500.000	20	25.000
Geotérmica	Inspección topográfica preliminar	400.000	20	20.000
	Exploración	600.000	20	30.000
	Perforaciones de prueba	100.000	20	5.000
	Revisión y planificación	200.000	20	100.000
	Desarrollo del campo	1.000.000	20	50.000
	Construcción	2.000.000	20	100.000
	Puesta en servicio	800.000	20	40.000
	Turbina	200.000	20	10.000



	Evaporador	100.000	20	5.000
	Condensador	100.000	20	5.000
	Bomba(x2)	400.000	20	20.000
	Torre de refrigeración	500.000	20	25.000
	TOTAL	8.900.000	20	445.000

Tabla 7.1: Costes de la fase de construcción.

7.1.2 Costes de la fase de explotación

7.1.2.1 Costes fijos

Los costes fijos se definen como costes constantes en el tiempo, es decir, salarios de personal, mantenimiento de las instalaciones... y otros similares relacionados.

- Personal

Área	Personal	Número	Coste (€/año)	Total
Desalinizadora	Jefe de planta	1	60.000	60.000
	Subjefe de planta	1	40.000	40.000
	Jefe de laboratorio	1	30.000	30.000
	Operarios	8	15.000	120.000
	Auxiliares	2	14.000	28.000
	Administrativo	2	12.000	24.000
Geotérmica	Jefe de planta	1	60.000	60.000
	Subjefe de planta	1	40.000	40.000
	Servicio de apoyo	2	20.000	40.000
	Operarios	6	15.000	90.000
	Auxiliares	2	14.000	28.000



	Administrativos	2	12.000	24.000
	TOTAL	29		584.000

Tabla 7.2: Costes fijos de personal en la fase de explotación.

- Mantenimiento

El coste de mantenimiento se calcula como una fracción del coste de inversión inicial de cada concepto.

Área	Concepto	Porcentaje	Inversión(€)	Total (€/año)
Desalinizadora	Instalaciones	0,75%	7.000.000	52.500
	Obra	0,5%	6.000.000	30.000
Geotérmica	Maquinaria	1%	1.300.000	13.000
	Servicios técnicos	1%	4.000.000	40.000
	TOTAL			135.500

Tabla 7.3: Costes fijos de mantenimiento en la fase de explotación.

- Otros

Se pueden considerar otros gastos fijos tales como seguros, transporte, gastos de oficina...

Concepto	Coste (€/año)
Oficina	3.000
Seguros	10.000
Seguridad	4.000
Control ambiental	20.000
Transporte	4.000
TOTAL	41.000

Tabla 7.4: Otros costes fijos

7.1.2.2 Costes variables

Son costes que dependen del caudal de agua a desalinizar y el flujo de refrigerante necesario para el ciclo ORC. Entre estos costes podemos destacar las bombas necesarias para el bombeo del agua salina a través de las membranas de la osmosis inversa, los productos químicos necesarios para el pretratamiento y post-tratamiento del agua, el recambio de filtros, las tuberías necesarias para el transporte de refrigerante, tanques, aislamiento y demás accesorios del ciclo.

- Energía

Concepto	Número	Tiempo de uso (h/día)	Coste (€/año)
Bombas sumergibles	20	24	200.000
Bombas de alta presión	30	24	200.000
Bombas intermedias	30	24	300.000
TOTAL	80	24	700.000

Tabla 7.5: Costes variables de energía en fase de explotación

- Productos químicos

Tratamiento	Consumo (kg/h)	Coste (€/año)
Desinfección	600	17.000
Limpieza general	500	5.000
Eliminación de residuos	400	4.000
Remineralización	500	10.000
TOTAL		36.000

Tabla 7.6: Costes variables de productor químicos en fase de explotación.

- Mantenimiento

Concepto	Número	Coste unitario (€/ud)	Coste (€/año)
Recambio de filtros	1000	200	200.000

Tabla 7.7: Costes variables de mantenimiento en fase de explotación.

- Refrigerante

Concepto	Tiempo de uso (h/día)	Coste unitario (€/kg)	Coste (€/año)
Refrigerante	24	10	10.000

Tabla 7.8: Costes variables de refrigerante en fase de explotación.

- Accesorios del ciclo

Concepto	Tiempo de uso (h/día)	Coste (€/año)
Tuberías	24	2.000
Tanques	24	30.000
Aislamiento	24	15.000
TOTAL	24	47.000

Tabla 7.9: Costes variables de accesorios del ciclo en fase de explotación.

Resumen de los costes de explotación:

Tipo de coste	Concepto	Coste (€/año)
Fijo	Personal	584.000
	Mantenimiento	135.500
	Otros	41.000
TOTAL COSTES FIJOS		760.500
Variable	Energía	700.000
	Productos químicos	36.000
	Mantenimiento	200.000
	Refrigerante	10.000



	Accesorios	47.000
TOTAL COSTES VARIABLES		993.000
TOTAL COSTES DE EXPLOTACIÓN		1.753.500

Tabla 7.10: Resumen de costes de explotación.

7.1.3 Coste del agua

Una vez han sido calculados los costes derivados del funcionamiento de la planta, se puede calcular el coste de un m³ de agua que se produce.

$$\text{Producción anual de agua} = 200 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 73.000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} = 73 \cdot 10^6 \frac{\text{l}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste anual de producción de agua (Costes de explotación)} = 1.753.500 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Por tanto:

$$\text{Coste del litro de agua} = \frac{\text{Coste anual}}{\text{Producción anual}} = \frac{1.753.500}{73.000.000} = 0,024 \frac{\text{€}}{\text{l}}$$

7.2 Impacto socio económico

Una vez calculado el presupuesto anual de este proyecto, para conocer la viabilidad del mismo será necesario conocer los ingresos anuales de la planta, y realizar un análisis de rentabilidad. Los criterios más apropiados para el análisis de alternativas de inversión son:

- Valor Actual Neto (VAN)
- Tasa Interna de Retorno (TIR)

Estos análisis de rentabilidad son adecuados porque tienen en consideración el valor del dinero en el tiempo, y se pueden definir de la siguiente manera:

- Valor Actual Neto (VAN)

Se conoce como Valor Actual Neto de una cantidad “S” a percibir en “n” años, con una tasa de interés “i” a la cantidad que si se tuviera a día de hoy, generaría al cabo de “n” años la cantidad “S”. La expresión matemática que lo refleja es:

$$VAN = \frac{S}{(1+i)^n}$$



Al realizar este análisis de inversión se suele contar con un desembolso inicial en el año 0 y en periodos sucesivos tener un flujo de caja (ingresos-gastos) variable o fijo. La expresión anterior calculada para periodos de tiempo sucesivos queda de la siguiente manera:

$$VAN = S_0 + \frac{S_1}{(1+i)} + \frac{S_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n}$$

Donde S_0 es la inversión inicial y S_n es el flujo de caja en el periodo de tiempo “n”.

En definitiva, cuanto mayor sea el VAN mayor será el beneficio que proporciona el proyecto.

- Tasa Interna de Retorno (TIR)

Se conoce como Tasa Interna de Retorno al valor de la tasa de interés “i” que hace 0 el Valor Actual Neto. Teniendo en cuenta la expresión anterior, la Tasa Interna de Retorno se calcula como:

$$VAN = 0 = S_0 + \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{(1+i)^k}$$

Es decir, con este interés los ingresos serían igual a los gastos y no se generaría beneficio ninguno. La Tasa Interna de Retorno se considera como el interés que genera un proyecto o inversión. Por tanto cuando mayor sea el TIR más rentable es una inversión.

Para poder calcular VAN y TIR, se va a suponer un precio de venta del litro de agua de 0,7 €, unos impuestos del 30%, tasa de rentabilidad 4% para el VAN y una amortización lineal de los equipos de 20 años.

- Ingresos anuales:

$$Ingresos_{año} = Producción\ anual\ de\ agua[l] \cdot Coste[€/l]$$

$$Ingresos_{año} = 7.300.000 \cdot 0,7 = 5.110.000 \text{ €/año}$$

Conociendo los ingresos y los gastos anuales, además de tasa de rentabilidad, amortización e impuestos, se procede a realizar el análisis de viabilidad:



Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
GASTOS (Miles de €)																
Inversión inicial	8.900															
Personal	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584	584
Mantenimiento planta		135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5
Energía		700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Productos químicos		36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Mantenimiento filtros		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Refrigerante		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Accesorios		47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
Otros	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
Amortización de equipos		445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
TOTAL DE GASTOS	9.525	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5	2.198,5
INGRESOS (Miles de €)																
Venta de agua (BAIT)		5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110	5.110
Impuestos (30%)		1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533	1.533
BENEFICIO ACUMULADO		3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577	3.577
FLUJO DE CAJA	-9.525	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5	1.378,5
VAN (i=7%)(Miles de €)	-9525	-8236,6	-7032,6	-5907,3	-4855,7	-3872,8	-2954,3	-2095,5	-1293,5	-543,7	+157,1	+811,9	+1423,9	+1996,1	+2530,6	+3030,2

Tabla 7.11: Análisis de rentabilidad.



Como se puede ver en la tabla, después de calcular el VAN, el proyecto empieza a ser rentable a partir del año 10, cuando el VAN es positivo, lo cual quiere decir que el proyecto empieza a generar beneficios. Es importante tener en cuenta que el proyecto no cuenta con ninguna subvención, aunque este tipo de proyectos suelen ser beneficiarios de subvenciones por parte del gobierno, por lo que empezaría a ser rentable antes.

Una vez calculado el VAN, que se calcula hasta el año 15, se procede al cálculo del TIR para ese mismo año, igualando el VAN a 0, gracias a una calculadora financiera online [52], el resultado es:

$$TIR = 12,48\%$$

Por lo que la tasa de interés podría ascender hasta ese número y el proyecto no tendría ni pérdidas ni ganancias. Es decir, es la rentabilidad mínima que se le puede exigir al proyecto pasados 15 años desde su construcción y puesta en marcha.

En definitiva, aunque el proyecto supone una inversión inicial elevada, lo cual es típico en proyectos novedosos que son operados con energías renovables, es fácil rentabilizarlo en un periodo de 10 años.



CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES



Finalmente, la planta desalinizadora produce 200 m³/día, 73.000 m³/año y el ciclo ORC genera una potencia neta de 88,4 kW con un rendimiento del 15,1%. La potencia que puede ser aprovechada por la desalinización son 531.294 kWh/año. Esta energía sirve para alimentar el proceso de desalinización, el cual utiliza la tecnología de Osmosis Inversa, que consume 59.203 kWh/año, y el resto de la energía eléctrica se destina al autoabastecimiento de la planta. Con estos resultados, se puede decir que la planta ha cumplido los objetivos marcados al principio.

Como ya se ha visto en los capítulos anteriores, el planeta se encuentra en una situación de demanda energética creciente, y esto obliga a tomar conciencia sobre ello y trabajar para potenciar las energías limpias.

Según se explica en el Capítulo 3, la desalinización geotérmica es una buena opción para ayudar a disminuir ambos problemas, ya que es una opción viable que podría cobrar más importancia en los próximos años. Por un lado, la energía geotérmica ayuda a disminuir el uso de combustibles fósiles en la producción eléctrica, y por el otro lado, la desalinización de agua de mar ayudaría a remediar la escasez de agua en muchas zonas del planeta.

Aunque España presenta un porcentaje muy bajo de uso de la energía geotérmica con respecto al resto de países del mundo, se ha visto como las Islas Canarias son un lugar óptimo para la construcción de una planta de media-alta entalpia para la producción de electricidad.

En el Capítulo 4 se demuestra como la tecnología ORC es una muy buena opción para la generación de electricidad a partir de recursos geotérmicos, ya que es una tecnología que permite un cierto margen de incertidumbre en la calidad del recurso, por lo que la calidad podría ser peor de lo esperado y la central podría seguir funcionando casi en el mismo punto de diseño. Además, es una de las tecnologías de generación de electricidad más respetuosas con el medio ambiente, por sus reducidas emisiones y su pequeño impacto visual, ya que es una tecnología de pequeño tamaño.

Una vez elegida esta tecnología, mediante la elección del fluido de trabajo, el refrigerante R245fa, se ha intentado elegir el más beneficioso tanto para el medio ambiente (bajos potenciales ODP y GWP), como para la durabilidad de la central (baja inflamabilidad) y para el aprovechamiento del recurso geotérmico. Estas características le hacen ser un refrigerante óptimo para la planta desalinizadora.

Por otro lado, en referencia a las técnicas de desalinización, la elección ha sido la Osmosis Inversa, y esto ha sido debido principalmente a su simplicidad, su bajo coste, su consumo de energía por debajo de las demás técnicas, su capacidad de producción, y su reducida ocupación del espacio. Esto la hace ser una técnica ideal para la desalinización en zonas turísticas como las Islas Canarias, donde el objetivo del agua desalinizada es abastecer a la población y turismo de la zona con un coste bajo.



Una vez elegidas ambas técnicas y realizada la simulación de la planta, se ha comprobado como la energía eléctrica generada por la geotérmica cubre la demanda energética necesaria para desalinizar 200 m³ de agua al día, y que sobre para el autoabastecimiento de la central, por lo que el objetivo de la central se ha cumplido.

Además, con respecto al tema económico, la inversión comenzaría a ser rentable a los 10 años desde su puesta en marcha, por lo que aunque suponga una gran inversión inicial, la implementación este tipo de tecnologías generaría un proyecto beneficioso tanto para la población, como para el medio ambiente y para el inversor.



ANEXO I: PROCESOS DE DESALINIZACIÓN



La desalinización es un proceso mediante el cual se elimina la sal del agua del mar, obteniendo agua con la calidad necesaria para el uso que se le vaya a dar. Hay múltiples procesos para desalar agua, los cuales podemos clasificar en dos grandes grupos: Desalinización térmica y desalinización de membrana.

La desalinización térmica se basa en la evaporación del agua, se forman vapores de agua pura y luego se condensan los mismos en una superficie fría, así se produce agua pura casi libre de sólidos disueltos, mientras que la mayoría de la sal ha sido eliminada al no poder evaporarse. Los procesos de desalinización de membrana, emplean una barrera física (membrana) que permite el paso de las moléculas de agua, y los sólidos disueltos no atraviesan la membrana, lo cual permite obtener agua con una concentración muy baja en sal.

Podemos ver todos los tipos de desalinización en la siguiente tabla:

TIPO DE SEPARACIÓN	PROCESO	TECNOLOGÍA
SEPARACIÓN DEL AGUA DE LAS SALES	Evaporación	Evaporación multiefecto de tubos horizontales (MED)
		Evaporación multiefecto de tubos verticales (VTE)
		Evaporación súbita multietapa (MSF)
		Compresión mecánica de vapor (VC)
		Compresión térmica de vapor (VCT)
		Destilación solar
		Destilación de tubos sumergidos
	Cristalización	Congelación
		Formación de hidratos
SEPARACIÓN DE LAS SALES DEL AGUA	Filtración	Ósmosis inversa (OI)
		Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) y Nanofiltración (NF)
	Intercambio iónico	Intercambio iónico
	Filtración selectiva	Electrodialisis (ED)
	Disolución	Extracción con disolventes

Tabla A.I.1: Tipos de procesos de desalinización



Esta tabla recoge todos los procesos de desalinización, sin embargo no todos tienen aplicación industrial debido a su bajo rendimiento o a su alto coste económico o energético. Por lo tanto podemos descartar algunas técnicas como: La destilación solar, ya que es poco rentable a nivel industrial, la evaporación multiefecto de tubos verticales y las técnicas de tubos sumergidos ya que ambas han quedado obsoletas, y la congelación, ya que es una técnica innovadora y todavía tiene rendimientos bajos para poder usarse a nivel industrial.

Por lo tanto las técnicas más adecuadas para desalinizar a escala industrial son: Evaporación Multiefecto de tubos horizontales (MED), Evaporación súbita en Multietapa (MSF), Compresión Mecánica de Vapor (VC), Compresión Térmica de Vapor (VCT), Osmosis Inversa (OI), Electrodialisis (ED) y los sistemas de filtración.

PROCESOS BASADOS EN LA DESTILACIÓN

- Evaporación Multiefecto de tubos horizontales (MED)

La técnica MED consiste en evaporar el agua de mar en varias etapas, condensar el vapor que se obtiene de esta evaporación y recuperar el calor para calentar más agua de mar y así poder repetir el ciclo.

La primera etapa es alimentada con vapor externo en torno a 80°C y en el resto de etapas se utiliza el calor de condensación que se recupera de la etapa anterior. En este caso, el proceso se divide en dos secciones, el condensador, que es el punto más frío del ciclo, y las fases del evaporador, que son el foco caliente del ciclo.

Primero, el vapor que aportamos como fuente externa de energía se condensa en el interior de los tubos haciendo pasar agua fría (del mar) por el exterior de estos, mientras esta se evapora. El vapor producido es colectado y enviado al interior de los tubos evaporadores del efecto siguiente, el cual tiene una presión y temperatura inferiores a las del anterior. La salmuera proveniente del primer efecto es también enviada al efecto siguiente donde se rocía sobre los tubos por los que circula el vapor repitiendo el proceso de evaporación. El vapor de cada uno de los efectos se convierte en agua desalada al ser condensado en el evaporador del efecto siguiente. Este proceso de repite de efecto en efecto, reduciéndose cada vez más la temperatura a la que tiene lugar y la presión en el interior de cada efecto, hasta llegar al condensador final.

Este condensador final utiliza un gran volumen de agua para condensar el vapor, por lo que no se llega a alcanzar la temperatura suficiente para que esta agua se evapore, simplemente se calienta. Esta agua se divide en dos partes, una parte volverá al ciclo y la otra se devuelve al mar.

El vapor condensado en el primer efecto se devuelve al ciclo externo del que procede, ya que es el condensado del vapor motriz. El condensado de los siguientes efectos se hace circular de un efecto a otro. Podemos ver el proceso en la siguiente figura:

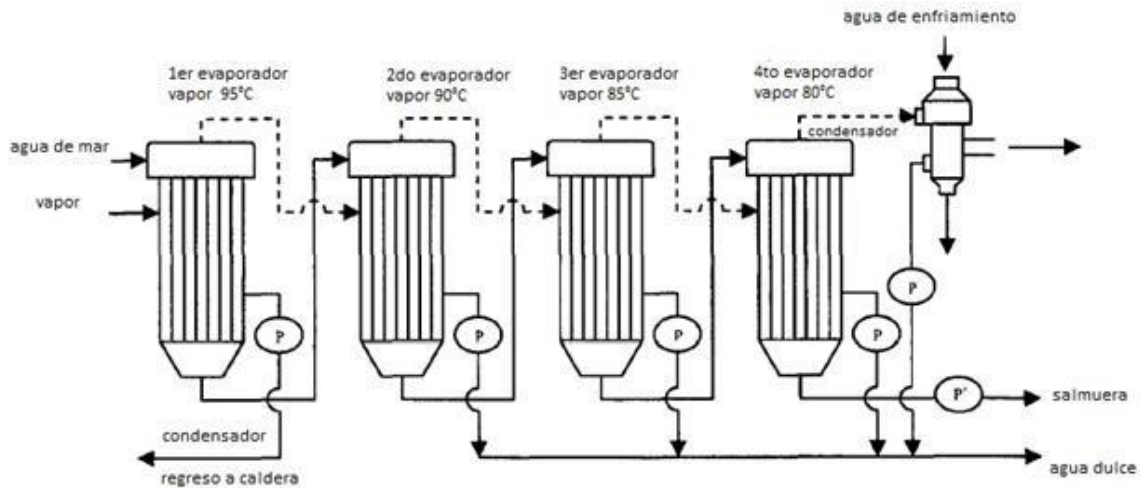


Figura A.I.1: Desalinización MED [42]

Vemos que después del último efecto se realiza una purga de salmuera para mantener el equilibrio salino del evaporador.

La fracción de agua desalada producida en estas plantas es también dependiente de la calidad del agua de alimentación. En este proceso la recuperación máxima es aproximadamente del 30-40%

- Evaporación instantánea en multietapa (MSF)

Es el proceso de destilación más utilizado, ya que es especialmente indicado para aguas con alto contenido salino y alta contaminación, debido a eso las plantas MSF tienen una capacidad mayor que otras plantas.

Este proceso, al igual que el anterior, consiste en la destilación de agua de mar para condensar después el vapor obtenido utilizando su calor latente para calentar más agua que se evaporará posteriormente. El principio de este proceso consiste en reducir súbitamente la presión del agua de mar por debajo de su presión de vapor, así ocurre una evaporación instantánea de esta. En una etapa solo una pequeña fracción del agua se evapora, por eso para lograr un resultado de producción óptimo se utilizan varias etapas a diferentes presiones, que se van reduciendo progresivamente.

Los componentes de una planta MSF son:

- Pretratamiento
- Evaporador MSF
- Calentador principal
- Eyectores de vacío

Primero se introduce el agua externa en la primera sección, el recalentador, donde la salmuera se encuentra a la máxima temperatura admisible. Después esta agua entra en el evaporador (cámara flash) a través de un orificio por la parte inferior, de tal forma que se produce una caída de presión suficiente para que la presión del agua sea menor a la presión de saturación a esa temperatura, por lo que el agua se evapora. Al ser una evaporación tan súbita, el vapor ha de pasar por unas mallas ("demisters") que sirven para separar las gotas de salmuera que han sido arrastradas. Una vez atravesados estos separadores de gotas, el vapor se condensa en la parte exterior de los tubos situados en la parte superior del evaporador, donde se recoge el vapor condensado en unas bandejas, desde donde posteriormente pasa a la etapa siguiente donde se repite el proceso. La salmuera sobrante de la primera etapa pasa a la parte inferior de la segunda etapa, y al final parte de la salmuera es devuelta al mar. En la siguiente imagen podemos ver un esquema del proceso:

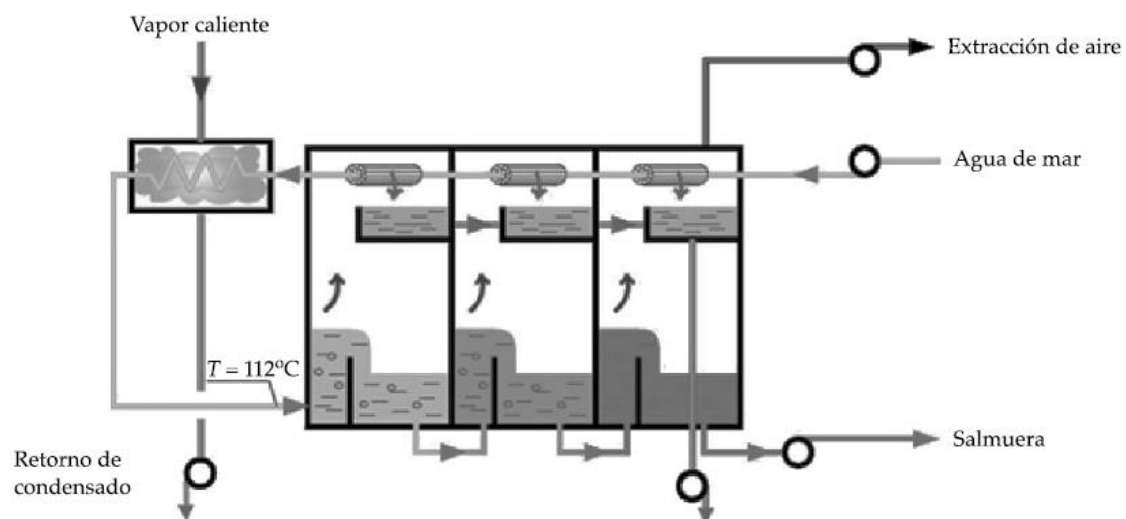


Figura A.I.2: Desalinización MSF

El porcentaje de recuperación del agua producida en relación con la cantidad de agua de mar ingresada a la planta depende de la calidad del agua de mar de alimentación y de la temperatura a la que opera la planta. En el proceso MSF la recuperación máxima es del orden del 12-20%.

- Compresión mecánica/ térmica de vapor

Este proceso consiste en evaporar el agua del mar, donde la energía necesaria para evaporarla proviene de aumentar la temperatura de condensación de vapores mediante un compresor y posteriormente se produce su condensación en un intercambiador de calor, enfriado con el mismo agua. Esta compresión puede ser mecánica o térmica.

En el proceso de compresión mecánica (CMV) se obtiene agua dulce a partir de energía eléctrica y un compresor. Funcionan comprimiendo vapor de agua, que se condensa sobre una superficie de transferencia de calor, lo cual permite al calor de la condensación ser transferido a la salmuera del otro lado de la superficie, resultando en la vaporización de ésta. El compresor crea un vacío en el interior de la cámara, aspira el vapor existente en su interior, lo comprime de nuevo y este se condensa en el interior de los tubos de la carcasa. El consumo de energía en el compresor depende de factores tales como el caudal de vapor, la diferencia de temperaturas en el evaporador y la temperatura de evaporación del fluido. Además, estas unidades de compresión mecánica de vapor están limitadas por el flujo máximo volumétrico del compresor y la capacidad de transferir calor en el evaporador.

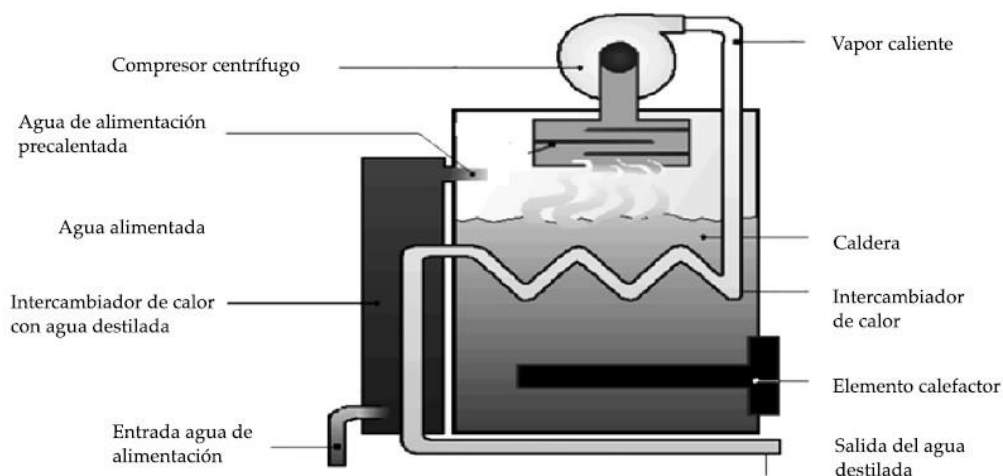


Figura A.1.3: Desalinización por CV [42]

El proceso de compresión térmica de vapor (CTV) es muy similar a la compresión mecánica. Este proceso usa una fuente de energía diferente, los termocompresores, que consumen vapor de media presión y que succionan parte del vapor generado en la última etapa a baja presión para que se pueda aportar a la primera etapa, que es la que consume energía en el proceso. Como el eyector de vapor es menos eficiente que un compresor centrífugo, estas plantas están construidas con muchos efectos para lograr una buena eficacia global [43].



En ambos casos, tanto en compresión mecánica como térmica, el consumo específico es menor que en el resto de instalaciones de destilación, pero como inconveniente la producción es considerablemente más baja.

La fracción de agua desalada en las plantas de compresión de vapor depende del agua de alimentación y de la temperatura. La recuperación máxima es aproximadamente del 40-50%.

PROCESOS BASADOS EN FILTRACIÓN MEDIANTE MEMBRANAS

- Osmosis inversa

La osmosis es un proceso químico espontáneo, en el cual las moléculas de disolvente de una disolución atraviesan una membrana semipermeable desde una solución de menor concentración de soluto hacia una solución con mayor concentración de este. La membrana hace de separador entre las dos disoluciones. Durante el proceso las partículas de la disolución se mueven en ambos sentidos, pero con una velocidad mayor hacia la zona donde la solución está más concentrada. Este proceso acaba cuando las velocidades se igualan. En ese momento, la presión es la misma en ambos lados de la membrana, por eso no hay flujo de partículas, y esta presión ejercida por las partículas es lo que se conoce como presión osmótica.

La presión osmótica queda definida por la siguiente fórmula:

$$\pi = MRT$$

Donde π es la presión osmótica, M la concentración de soluto en mol/litro, R la constante de los gases ideales, y T la temperatura en grados kelvin.

La osmosis inversa consiste en invertir este proceso, aplicando una presión (superior a la presión osmótica) en la zona de la solución con mayor concentración de soluto, y el movimiento se produce al revés, desde la zona más concentrada a la más diluida. Para poder desalar el agua de mar por osmosis inversa es necesario una membrana semipermeable y una fuerza externa para bombear el agua a través de la membrana.

En la siguiente imagen podemos ver un esquema sencillo de los procesos, tanto de osmosis directa como osmosis inversa:



Figura A.I.4: Desalinización OI [43]

La ventaja de la desalación por osmosis inversa es que no se necesita calentamiento del fluido ni cambio de fase del mismo, por lo que supone un ahorro de energía, energía que utilizaremos para aplicar la presión al agua marina de alimentación, la cual es mayor cuanto mayor sea la salinidad del agua [44].

Otra ventaja bastante importante es su flexibilidad, dado que es un diseño que se puede utilizar para varios tamaños de producción y para aguas de concentraciones salinas muy dispares, lo cual amplía su utilidad en los procesos de desalinización.

La fracción de agua desalada es aproximadamente del 45%, y cabe destacar que el agua obtenida tiene una calidad superior que la que se obtiene en los procesos de evaporación.

- **Electrodialisis**

La electrodialisis es un proceso de separación que se basa en el paso de una corriente eléctrica en una solución iónica mientras que se colocan de forma alternativa unas membranas semipermeables catiónicas y aniónicas entre dos electrodos. Los iones positivos se moverán hacia el electrodo negativo y los negativos hacia el electrodo positivo. Gracias a las membranas el agua se va desalinizando progresivamente ya que estas permiten el paso de Na^+ o Cl^- , limitando la migración de estas moléculas entre los electrodos.

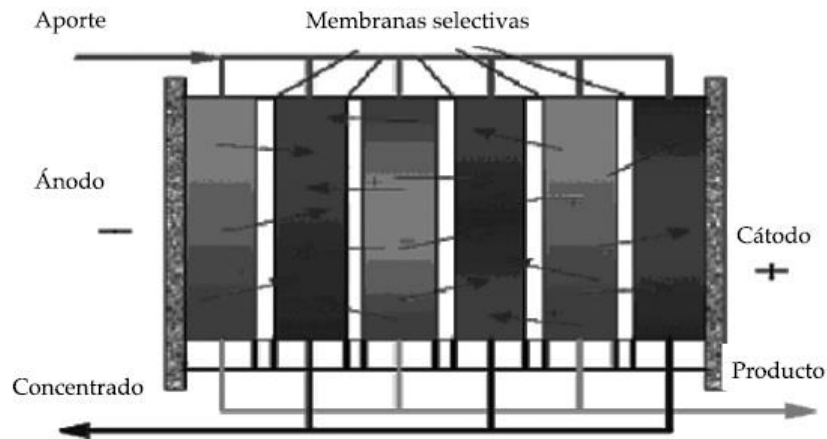


Figura A.I.5: Desalinización por Electrodiálisis [44]

Estos sistemas de desalinización por electrodiálisis necesitan una gran cantidad de energía para poder producir la corriente constante que pasa por la solución, y para bombear el agua del sistema. Dado que el consumo energético es más alto que en el resto de tecnologías de desalinización, la electrodiálisis no es una opción muy utilizada para el tratamiento de agua salada a gran escala.

- Sistemas de filtración

La filtración mediante membranas sigue el principio de separación de partículas basándose en el tamaño de estas y su distribución, y permite la producción de agua de elevada calidad. Los distintos rangos de membranas [45] son:

- Microfiltración: Las membranas tienen unos poros de tamaño de 0,1-10 μm , las cuales retienen bacterias, macromoléculas, turbidez, etc. El material utilizado para este tipo de membranas puede ser polietileno, nylon o polipropileno.
- Ultrafiltración: Las membranas retienen moléculas de un tamaño de 0,001-0,1 μm . Estas membranas de menor tamaño retienen sustancias orgánicas nocivas, virus, macroproteínas, etc.
- Nanofiltración: Estas membranas retienen partículas de un tamaño de 0,001 μm - 0,1 nm. Pueden separar moléculas disueltas, metales pesados, nitratos... y se pueden usar como pretratamiento de la osmosis inversa.

En la siguiente imagen podemos ver una comparación de los distintos tipos de filtrado según el tamaño de los poros de las membranas, en la que vemos que partículas dejan pasar las membranas y cuales no:

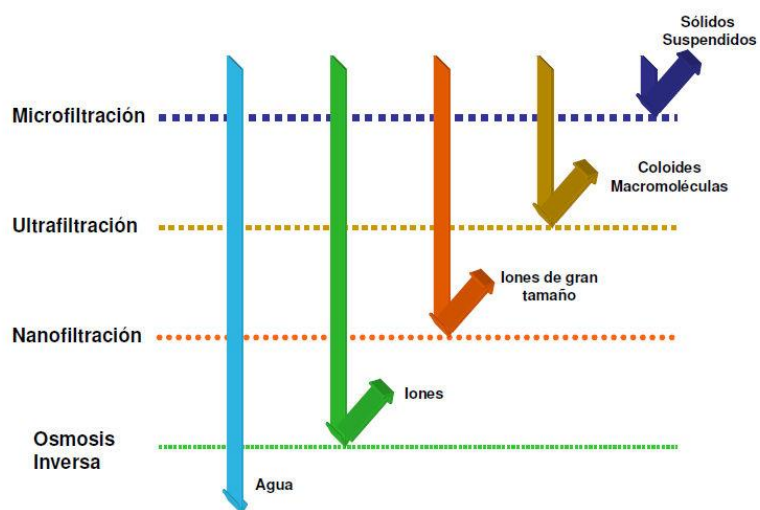


Figura A.I.6: Desalinización por filtrado [46]



ANEXO II: CICLO RANKINE

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico cuyo objetivo es la conversión de calor a trabajo, es decir, es un ciclo de potencia. Este ciclo es una representación del proceso termodinámico en el que se basa una central de vapor.

El fluido de trabajo utilizado normalmente es el agua, pero se pueden utilizar múltiples alternativas, cualquier fluido que pueda evaporarse y condensarse (ej: Ciclos Rankine Orgánicos). Cuando se produce la quema de combustible en la caldera, en esta se genera vapor a alta presión que se conduce a una turbina, donde se expande y genera trabajo mecánico. La turbina tiene un eje unido a un generador eléctrico, que transforma el trabajo mecánico en electricidad. El vapor una vez expandido en la turbina pasa por un condensador, donde se condensa y pasa a líquido saturado. Generalmente el condensador está refrigerado gracias a alguna corriente de refrigeración que evacua el calor. Por último, una bomba vuelve a aumentar la presión del fluido líquido y este vuelve a pasar por la caldera, por lo que el ciclo ya estaría cerrado.

Podemos ver un esquema simplificado del ciclo Rankine en la siguiente imagen:

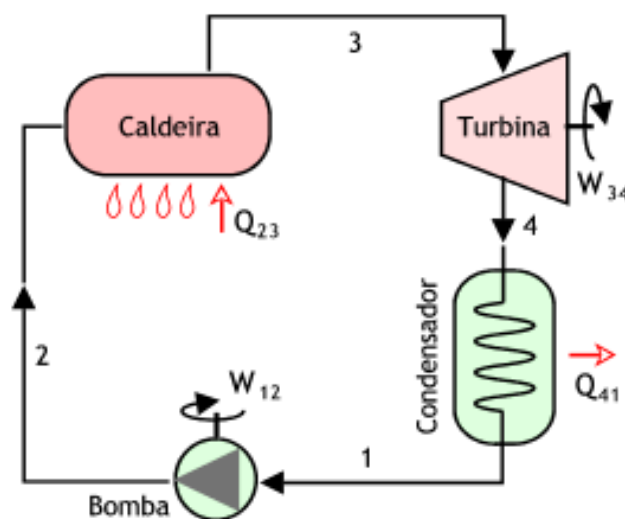


Figura A.II.1: Ciclo Rankine [47]

FLUIDO IDEAL PARA UN CICLO RANKINE

Las características principales que tiene que presentar un fluido para ser potencialmente adecuado para un ciclo Rankine son:

- Tener un alto valor del calor latente de vaporización a su temperatura característica de vaporización
- Tener una temperatura crítica superior a la temperatura de funcionamiento más alta, ya que si no, no se produciría el cambio de fase.
- Tener bajo valor de la capacidad calorífica del líquido.



- Ser líquido a presión atmosférica y temperatura ambiente.
- Que se produzca poca variación de la entalpía con la presión.
- No tener un valor muy elevado de la presión de vapor a la máxima temperatura de funcionamiento, y tener un valor de la presión de vapor mayor que la presión atmosférica para temperaturas más bajas.
- Tener un alto valor de conductividad térmica.
- Ser un fluido barato, estable, no inflamable, no corrosivo y abundante en la naturaleza.

No hay fluidos que cumplan todas las perfectamente, por este motivo el agua es el fluido más utilizado para este ciclo ya que es muy abundante y no es cara, aunque no cumple muchas de las características ya que por ejemplo, tiene una temperatura crítica elevada, y una alta capacidad calorífica.

ETAPAS DEL CICLO RANKINE

Las etapas de un ciclo Rankine [48] las podemos definir por los siguientes procesos (numerados según la imagen anterior):

- Proceso 1-2: Compresión isoentrópica del fluido líquido. Esta compresión es realizada por una bomba, que aumenta la presión del fluido desde la presión del condensador (presión de baja) hasta la presión de la caldera (presión de alta). Esta compresión genera un consumo de potencia, que normalmente es mínimo comparado con la potencia generada en la turbina.
- Proceso 2-3: Aporte de calor al fluido a presión constante (presión de alta) en la caldera. Este proceso generalmente se puede dividir en 3 tramos, en el primer tramo el fluido se calienta hasta su temperatura de saturación, en el segundo el fluido cambia de fase de líquido a vapor, obteniendo vapor saturado, y el tercer tramo que no se da siempre, que es un recalentamiento del vapor para aprovechar la energía de los gases en el sobrecalentador y aumentar el trabajo de la turbina.
- Proceso 3-4: Expansión isoentrópica del fluido en una turbina desde la presión de la caldera (presión de alta) hasta la presión del condensador (presión de baja). La turbina de vapor posee un eje en el cual se genera el trabajo mecánico, que posteriormente se transforma en energía eléctrica gracias a un generador conectado al eje de la turbina.
- Proceso 4-1: Transmisión de calor a presión constante (presión de baja) en el condensador. El fluido de trabajo cede calor al circuito de refrigeración hasta que el fluido alcanza el estado de líquido saturado. Este calor cedido por el fluido puede ser aprovechado para otros procesos.

En la siguiente imagen podemos ver el ciclo ideal representado en un diagrama T-s:

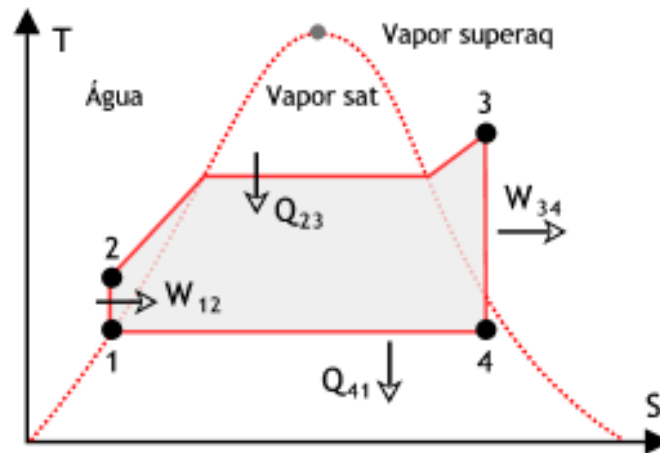


Figura A.II.2: Diagrama T-s del ciclo Rankine [48]

Divergencias entre un ciclo real e ideal

Un ciclo de potencia real difiere del ciclo ideal generalmente por las irreversibilidades en los dispositivos del ciclo generadas por las pérdidas de calor y fricción.

- Pérdidas por fricción: La fricción entre el fluido y las paredes genera caídas de presión en la caldera, el condensador y las tuberías que conectan los componentes. Estas caídas de presión tienen que ser compensadas con presiones más altas en la etapa de bombeo.
- Pérdidas de calor: Cuando el fluido circula por los componentes del ciclo es inevitable que se produzca pérdidas de calor por los alrededores ya que los elementos no son totalmente aislantes del calor.
- Irreversibilidades en las bombas y turbinas: En las bombas y las turbinas se producen variaciones de entropía entre la entrada y la salida de las mismas. Estas variaciones provocan una disminución del trabajo generado por la turbina y un aumento del trabajo aplicado a la bomba.

En la siguiente imagen podemos ver una comparación del ciclo real con el ideal:

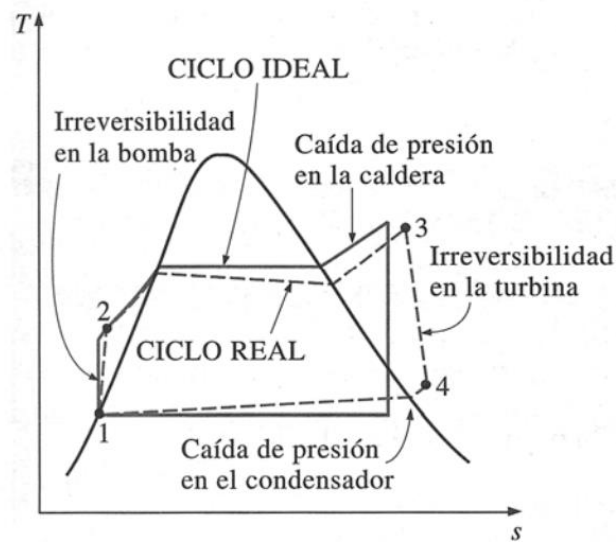


Figura A.II.3: Divergencias entre un ciclo ideal y uno real [48]

Rendimiento de un ciclo Rankine

El rendimiento de un ciclo Rankine viene definido por la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{abs}}$$



ANEXO III: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS ORGÁNICOS



En la naturaleza hay una gran cantidad de fluidos orgánicos, es decir, compuestos químicos que poseen cadenas de hidrocarburos, los cuales son muy útiles para su utilización en ciclos Rankine orgánicos. El ciclo Rankine se utiliza en muchas plantas de generación eléctrica, donde el agua es el fluido de trabajo, pero se puede sustituir por un fluido orgánico dando lugar al ORC. La única variación respecto al ciclo anterior es el fluido de trabajo, por tanto el diagrama T-s del ciclo varía y puede llegar a ofrecer unos parámetros totalmente distintos.

La selección del fluido de trabajo para su uso en los ciclos de ORC es un aspecto crucial porque, dependiendo de la aplicación, la fuente y el nivel de calor a utilizar, el fluido debe tener propiedades termodinámicas óptimas a las temperaturas y presiones más bajas posibles y también cumplen varios criterios, como ser económicos, no tóxicos, no inflamables, respetuosos con el medio ambiente, permitir un alto uso de la energía disponible de la fuente de calor, etc. Esto limita la lista a unos pocos fluidos si se consideran todos los aspectos [49] que pueden restringir su uso, los cuales podemos resumir en:

- **Ambiental:** Algunos fluidos están siendo restringidos dependiendo de su potencial de agotamiento de ozono (ODP), o en el potencial de efecto de invernadero (GWP) en relación con las limitaciones de Kioto, que pretenden prevenir la destrucción de la capa de ozono y la emisión de gases que causan el efecto invernadero, respectivamente.
- **Seguridad:** El fluido debe ser no tóxico (en caso de fugas en la planta o durante la manipulación), no corrosivo (para evitar mayores costes de mantenimiento y daños en las instalaciones) y no inflamable.
- **Estabilidad:** La estabilidad química del fluido utilizado puede limitar la temperatura de la fuente de calor, ya que se puede descomponer cuando se expone a ciertas temperaturas, produciendo sustancias que podrían modificar la forma en que funciona el ciclo. Además, puede resultar en compuestos tóxicos e irritantes que podrían inducir problemas de salud si se producen fugas.
- **Presión:** Cuando un fluido requiere altas presiones para que el proceso sea eficiente, los costos del equipo son mayores debido a la alta resistencia que deben soportar, aumentando también la complejidad de la planta.
- **Disponibilidad y bajo coste:** Un fluido de baja disponibilidad y alto coste limita su uso en plantas ORC por razones obvias, dada la viabilidad financiera de los proyectos.
- **Calor latente y peso molecular:** Cuanto mayor sea el peso molecular y el calor latente del fluido, más energía podrá ser absorbida por la fuente de calor en el evaporador y, por lo tanto, el tamaño de la instalación y el consumo de la bomba puede ser menor, debido a la disminución del caudal requerido.
- **Punto de congelación bajo:** El punto de congelación del fluido debe ser inferior a la temperatura más baja del ciclo.

• Curva de saturación: Una de las variaciones más notables de los fluidos orgánicos con respecto al agua es la curva de saturación del diagrama T-s. En la siguiente imagen podemos comparar las curvas de saturación de ciclos Rankine estándar y ciclos ORC:

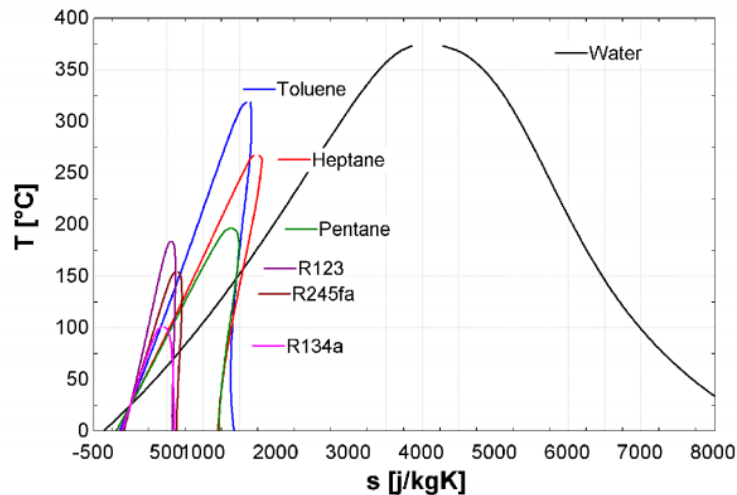


Figura A.III.1: Curvas de saturación de fluidos orgánicos [50]

En la figura podemos ver dos diferencias principales:

- La pendiente de la curva de vapor saturado es negativa para el agua, mientras que la curva es mucho más vertical para los fluidos orgánicos. Como consecuencia, la limitación de la calidad del vapor al final del proceso de expansión desaparece en un ciclo de ORC, y no hay necesidad de sobrecalentar el vapor antes de la entrada de la turbina.
- La diferencia de entropía entre el líquido saturado y el vapor saturado es mucho menor para los fluidos orgánicos. Esto también implica que la entalpía de vaporización es menor. Por lo tanto, para la misma potencia térmica a través del evaporador, el caudal másico del fluido de trabajo orgánico debe ser mucho mayor que el del agua, lo que conduce a un mayor consumo de la bomba.

Si separamos los fluidos con respecto a esta curva, los fluidos se clasifican en secos, húmedos o isoentrópicos, los cuales se diferencian en:

- Los fluidos secos tienen una pendiente de la curva de vapor saturado (parte derecha del diagrama) positiva, es decir, $dT/ds > 0$.
- Los fluidos isoentrópicos tienen una pendiente prácticamente infinita, por lo que la curva de vapor saturado es vertical, paralela a la línea de expansión isoentrópica, por lo que $dT/ds \approx 0$.
- Los fluidos húmedos, como el agua, tienen una pendiente de la curva negativa, por lo tanto $dT/ds < 0$.

En la siguiente figura podemos ver un ejemplo de cada uno de estos tipos de fluido:

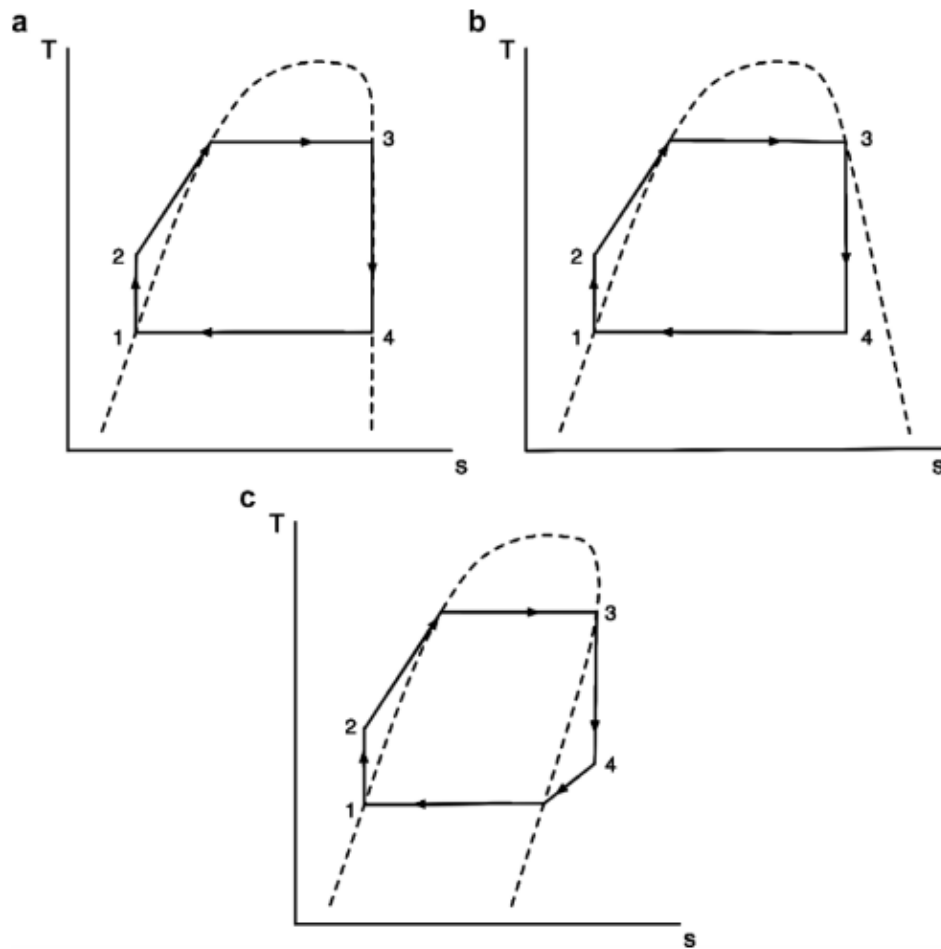


Figura A.III.2: Diagrama T-s de distintos tipos de fluidos [51]

Donde la figura a) pertenece a un fluido isentrópico, la figura b) a un fluido húmedo, y la c) es de un fluido seco.

Las propiedades termodinámicas del fluido afectan a la curva de saturación, lo que afectará en gran medida el diseño y la eficiencia de la ORC. Dado que el objetivo del ciclo ORC se centra en el uso de calor a bajas y medias temperaturas, el recalentamiento del vapor, como en el tradicional ciclo de Rankine de vapor, no es apropiado. Además, como se muestra en la figura b), cuando ocurre una expansión de un fluido húmedo sin sobrecalentamiento, cae en el área de líquido / vapor, causando daño a la turbina e ineficiencias en el ciclo, entre otras razones, debido al cambio de fase. El caso opuesto ocurre con los fluidos isentrópicos y secos que, sin ningún tipo de sobrecalentamiento, expansión y caída en la zona de vapor saturado o en la zona sobrecalentada.



ANEXO IV: ELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO



Una vez definidos límites y restricciones del ciclo, solo nos faltan los datos de partida para llevar a cabo la primera simulación del ORC. Para ello serán necesarios tres valores del diagrama T-s, los cuales serán elegidos teniendo en cuenta los valores críticos de ambos refrigerantes. Los datos de partida elegidos son:

- Presión de alta del ciclo: Es la mayor presión a la que está sometida el fluido de trabajo, la cual definiremos en 30 bares.
- Presión de baja del ciclo: Es la menor presión a la que se encuentra el fluido de trabajo en el ciclo, la cual tiene un valor de 3 bares, lo cual nos proporcionaría una relación de compresión de 10 que es un valor más que aceptable.
- Temperatura a la salida del evaporador: Como ya hemos visto antes, es muy importante el valor de esta temperatura y depende de la temperatura crítica, por tanto para cada refrigerante tendremos un valor dependiendo de su temperatura crítica:
 - R134a: $T_c=101\text{ °C}$ por tanto $T_1=91\text{ °C}$
 - R245fa: $T_c=154\text{ °C}$ por tanto $T_1=144\text{ °C}$
- Además hay que definir un valor independiente, que es el flujo másico de refrigerante, el cual para esta primera simulación y por simplificar le daremos el valor de 1 kg/s.

Por lo tanto, los valores iniciales supuestos para elegir un fluido de trabajo vienen recogidos en la siguiente tabla:

Fluido	Presión alta (Pa)	Presión baja (Pa)	T salida evaporador(°C)	Flujo másico (kg/s)
R134a	$30 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	91	1
R245fa	$30 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	144	1

Tabla A.IV.1: Datos de partida

El diagrama T-s de ambos fluidos, al ser fluidos secos, está inclinado hacia la derecha de tal forma:

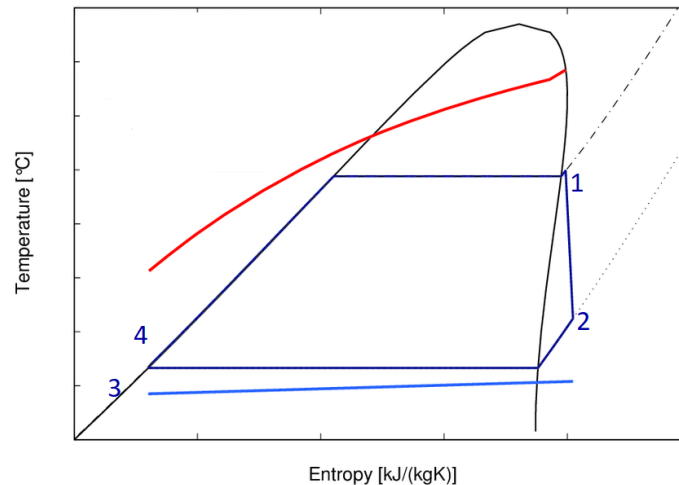


Figura A.IV.1: Diagrama T-s de los fluidos secos

Donde los procesos llevados a cabo son:

- Proceso 1-2: Expansión del fluido en una turbina.
- Proceso 2-3: Transmisión de calor a presión constante (presión de baja) en el condensador.
- Proceso 3-4: Compresión del fluido líquido.
- Proceso 4-1: Aporte de calor al fluido a presión constante (presión de alta) en la caldera.

Estos procesos ya están definidos con más detalle en el ANEXO II.

Una vez definidos los datos de partida del ciclo, podemos ir calculando cada punto del ciclo gracias a la biblioteca de fluidos CoolProp implementada en Matlab. El proceso a seguir ha sido en ambos fluidos el mismo, descrito en los siguientes pasos:

- Punto 1: Para obtener el punto 1 tenemos los datos de partida P_1 y T_1 , con los que obtendremos h_1 y s_1 además de comprobar como el título de vapor x_1 en ese punto es 1 (vapor saturado o sobresaturado)
- Punto 2: Para definir este punto, como hemos definido la turbina isoentrópica, tenemos el valor de s_2 que es el mismo que s_1 , y con la presión de baja ya queda definido el punto 2 y podemos sacar su entalpía h_2 .
- Punto 3: Es el punto de salida del condensador, en el cual tiene que haber líquido saturado es decir el título de vapor x_3 tiene que ser 0. Y conociendo la presión de baja ya tenemos definido el punto 3, del cual obtenemos h_3 y s_3 .
- Punto 4: Al igual que la turbina la bomba es isoentrópica, por tanto la entropía del punto 4 es la misma que la del 3, y con la presión de alta ya está el punto 4 definido y podemos obtener su entalpía h_4 .

Los valores obtenidos para cada refrigerante se muestran en las siguientes tablas:

R134a

Punto	Entalpía(kJ/kg)	Entropía(kJ/kg·K)	Título de vapor	Temperatura (K)
1	437,75	1,7036	1	364,15
2	392,67	1,7036	0,968	273,82
3	200,9	1,0033	0	273,82
4	202,99	1,0033	0	274,90

Tabla A.IV.2: Resultados del ciclo para el R134a

- Trabajo proporcionado por la turbina:

$$W_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 1 \cdot (437,75 - 392,67) = 45,08 \text{ kW}$$

- Trabajo consumido por la bomba:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) = 1 \cdot (202,99 - 200,9) = 2,09 \text{ kW}$$

- Calor absorbido en el evaporador:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = 1 \cdot (437,75 - 202,99) = 234,76 \text{ kW}$$

- Calor cedido en el condensador:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 1 \cdot (392,67 - 200,9) = 191,77 \text{ kW}$$

- Trabajo neto:

$$W_{neto} = W_t - W_b = 45,08 - 2,09 = 42,99 \text{ kW}$$

- Rendimiento:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{evap}} = \frac{42,99}{234,76} = 0,1831$$

R245fa

Punto	Entalpía(kJ/kg)	Entropía(kJ/kg·K)	Título de vapor	Temperatura (K)
1	490,68	1,7993	1	417,15
2	450,30	1,7993	1	329,83
3	260	1,2049	0	318,72
4	262,77	1,2049	0	319,84

Tabla A.IV.3: Resultados del ciclo para el R245fa.



- Trabajo proporcionado por la turbina:

$$W_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 1 \cdot (490,68 - 450,3) = 40,38 \text{ kW}$$

- Trabajo consumido por la bomba:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) = 1 \cdot (262,77 - 260) = 2,77 \text{ kW}$$

- Calor absorbido en el evaporador:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = 1 \cdot (490,68 - 262,77) = 227,33 \text{ kW}$$

- Calor cedido en el condensador:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 1 \cdot (450,3 - 260) = 190,3 \text{ kW}$$

- Trabajo neto:

$$W_{neto} = W_t - W_b = 40,38 - 2,67 = 37,61 \text{ kW}$$

- Rendimiento:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{evap}} = \frac{37,61}{227,33} = 0,1658$$

Como se puede observar, el refrigerante R134a proporciona un rendimiento ligeramente superior al R245fa por lo que podría ser el candidato elegido para ser el fluido de trabajo del ciclo, sin embargo al realizar el cálculo del título de vapor a la salida de la turbina, en el caso del refrigerante R134a el valor no es uno, es 0,968 lo cual podría suponer problemas ya que si hay gotas presentes a la salida de la turbina es muy probable que se produzca un deterioro y corrosión de los alabes de la misma, por lo que este fluido queda descartado. El fluido elegido por tanto es el R245fa.



ANEXO V: ELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL CICLO

Una vez elegido el fluido de trabajo con el que va a operar el ciclo, el cual se ha elegido a través de una simulación de un ciclo Rankine simple e ideal, se va a elegir la configuración final del ciclo. Para ello se comparan los resultados del ciclo Rankine simple (S-ORC) con un ciclo Rankine con intercambiador de calor interno (IHE-ORC) y con un ciclo Rankine con Regeneración (R-ORC), ambos ideales.

La configuración S-ORC ya está calculada en el *ANEXO IV*, por lo que se procede al cálculo de las otras dos configuraciones:

IHE-ORC

Esta configuración es una modificación del S-ORC, con la novedad de que posee un intercambiador de calor intermedio para aprovechar el calor del fluido a la salida de la turbina, para así reducir el calor absorbido en el evaporador. Esta medida sirve para incrementar la eficiencia sin reducir el trabajo neto proporcionado por el ciclo.

Podemos ver un esquema del ciclo en la siguiente figura:

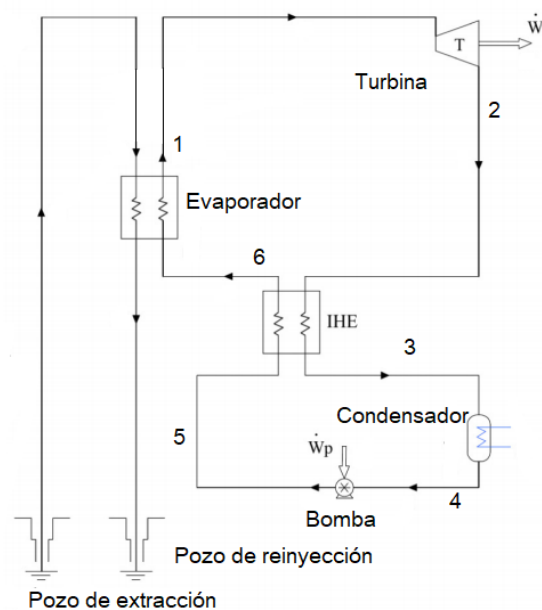


Figura A.V.1: Ciclo IHE-ORC [19]

Los datos de partida del ciclo son los mismos que en el S-ORC para poder comparar los resultados de forma igualitaria. Los resultados son los siguientes:

Punto	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg·K)	Presión (bar)	Temperatura (K)
1	490,68	1,7993	30	417,15
2	450,3	1,7993	3	329,3
3	440,69	1,7697	3	320
4	260	1,2049	3	318,74
5	262,77	1,2049	30	319,84
6	272,38	1,2346	30	326,86

Tabla A.V.1: Resultados del IHE-ORC

La diferencia con respecto al ciclo simple, es que ha habido que hacer un balance de energía en el intercambiador de calor interno para definir el punto 6:

$$Q_{IHE} = \dot{m} \cdot (h_6 - h_5) = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$h_6 - 262,77 = 450,30 - 440,69$$

$$h_6 = 272,38 \text{ kJ/kg}$$

- Trabajo proporcionado por la turbina:

$$W_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 1 \cdot (490,68 - 450,3) = 40,38 \text{ kW}$$

- Trabajo consumido por la bomba:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_5 - h_4) = 1 \cdot (262,77 - 260) = 2,77 \text{ kW}$$

- Calor absorbido en el evaporador:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) = 1 \cdot (490,68 - 272,38) = 218,3 \text{ kW}$$

- Calor cedido en el condensador:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) = 1 \cdot (440,69 - 260) = 180,69 \text{ kW}$$

- Trabajo neto:

$$W_{neto} = W_t - W_b = 40,38 - 2,77 = 37,61 \text{ kW}$$

- Rendimiento:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{evap}} = \frac{37,61}{218,3} = 0,1722$$

R-ORC

Esta configuración tiene una variación con respecto al S-ORC que consiste en la extracción de vapor en etapas intermedias de la turbina para calentar el agua que sale del condensador, y de la misma manera que en la configuración anterior, se incrementa la eficiencia del ciclo sin variar el trabajo neto obtenido. En la siguiente figura podemos ver el esquema del ciclo:

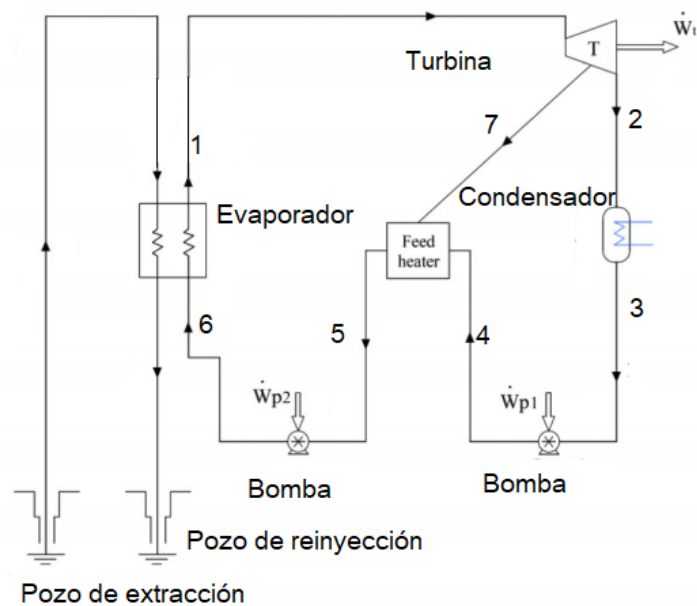


Figura A.V.2: Ciclo R-ORC [19]

Al igual que antes, los datos de partida son los mismos que los del S-ORC, y además se define la presión intermedia del Feed Heater como:

$$P_{FH} = \sqrt{P_{alta} \cdot P_{baja}} = \sqrt{30 \cdot 3} = 9,48 \text{ bar}$$

Se puede hacer un balance de energía en el FH para calcular la parte de vapor que se extrae de la turbina de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} (1-x)\dot{m} \cdot h_4 + x\dot{m} \cdot h_7 &= \dot{m} \cdot h_5 \\ 261,17 - 261,17x + 471,88x &= 321,07 \\ x &= 0,283 \end{aligned}$$



Los resultados obtenidos son:

Punto	Entalpia (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg·K)	Presión (bar)	Temperatura (K)
1	490,68	1,7993	30	417,15
2	450,3	1,7993	3	329,3
3	260	1,2049	3	318,74
4	261,17	1,2049	9,48	319
5	321,01	1,3810	9,48	360,65
6	322,79	1,3810	30	362,05
7	471,88	1,7993	9,48	363,57

Tabla A.V.2: Resultados del R-ORC

- Trabajo proporcionado por la turbina:

$$W_t = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 1 \cdot (490,68 - 450,3) = 40,38 \text{ kW}$$

- Trabajo consumido por la bomba 1:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) = 1 \cdot (261,17 - 260) = 1,17 \text{ kW}$$

- Trabajo consumido por la bomba 2:

$$W_b = \dot{m} \cdot (h_6 - h_5) = 1 \cdot (322,79 - 321,01) = 1,78 \text{ kW}$$

- Calor absorbido en el evaporador:

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) = 1 \cdot (490,68 - 322,79) = 167,89 \text{ kW}$$

- Calor cedido en el condensador:

$$Q_{cond} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 1 \cdot (450,3 - 260) = 190,3 \text{ kW}$$

- Trabajo neto:

$$W_{neto} = W_t - W_{b1} - W_{b2} = 40,38 - 1,17 - 1,78 = 37,43 \text{ kW}$$

- Rendimiento:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{evap}} = \frac{37,43}{167,89} = 0,222$$



BIBLIOGRAFÍA



- [1] Geothermal.
Available: <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/geothermal/> [9/12/, 2016].
- [2] Evaluación del potencial de energía geotérmica.
Available: <http://www.idae.es/sites/default/files/publications/online/511/index.html> [12/12/, 2016]
- [3] EL GRADIENTE GEOTÉRMICO.
Available: <http://culturacientificaanamora.blogspot.com.es/2015/12/el-gradiente-geote.html> [14/12/, 2016].
- [4] PublicaMadrid - Guía de la energía geotérmica.
Available: http://www.madrid.org/cs/Satellite?c=CM_Publicaciones_FA&cid=1142441279425&idConsejeria=1109266187242&idListConsj=1109265444710&language=es&pagename=ComunidadMadrid/Estructura&sm=1109265844004 [15/12/, 2016].
- [5] GUDE, V.G., 2016. *Geothermal source potential for water desalination – Current status and future perspective*.
- [6] Publication: Technology Roadmap: Geothermal Heat and Power.
Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-geothermal-heat-and-power.html> [16/12/, 2016].
- [7] Energía geotérmica.
Available: <http://studylib.es/doc/4506757/21.-energía-geotérmica> [17/12/, 2016].
- [8] Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo | El Periodico de la Energía.
Available: <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> [7/01/, 2017].
- [9] IEA, 2014. *Energy Policies of IEA Countries. The United States. 2014 Review*.
- [10] Energía Geotérmica.
Available: <https://www.emaze.com/@AWCOIZWT/Energía-Geotérmica> [10/01/, 2017].
- [11] Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. TÍTULO IV. Regulación de los aprovechamientos de recursos de la sección B.
Available: http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/l22-1973.t4.html [10/02/, 2017].
- [12] *Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería*. 1978.
- [13] *Ley 54/1980, de 5 de noviembre, de modificación de la Ley de Minas, con especial atención a los recursos minerales energéticos*.
- [14] *Real Decreto 1327/1995, de 28 de julio, sobre las instalaciones de desalación de agua marina o salobre*.
- [15] Gobierno de Canarias.
Available: <http://www.gobiernodecanarias.org/principal/> [19/02/, 2017].



- [16] IDECanarias visor 4.3.
Available: <http://visor.grafcan.es/visorweb/> [24/02/, 2017].
- [17] IDAE, 2012. *Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables. Área tecnológica: Geotermia*
- [18] HERRERA, P., 2013-last update, Sistemas de aprovechamiento de fuentes geotérmicas.
Available: <https://energiachiccuadrado.com/2013/01/29/sistemas-de-aprovechamiento-de-fuentes-geotermicas-iii/> [24/02/, 2017]
- [19] ARE, V., 2015. *A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants.*
- [20] WANG, E., YU, Z. and ZHANG, F., 2017. Investigation on efficiency improvement of a Kalina cycle by sliding condensation pressure method. *Energy Conversion and Management*, **151**, pp. 123-135.
- [21] ZHAI, H., SHI, L. and AN, Q., 2014. *Influence of working fluid properties on system performance and screen evaluation indicators for geothermal ORC (organic Rankine cycle) system.*
- [22] Pure and Pseudo-Pure fluid properties — CoolProp 6.1.0 documentation.
Available: http://www.coolprop.org/fluid_properties/PurePseudoPure.html#list-of-fluids [30/03/, 2017].
- [23] PUERTO, E. Diseño e ingeniería de climatización y ventilación. Refrigerantes y ecología.
- [24] Flammable Liquids. IMO Classes for Dangerous Goods. Hazardous cargoes. Perilous freight transportation by sea.
Available: <https://www.searates.com/reference/imo/3/> [20/04/, 2017].
- [25] MOKHTARI, H., HADIANNASAB, H., MOSTAFAVI, M., AHMADIBENI, A. and SHAHRIARI, B., 2016. *Determination of optimum geothermal Rankine cycle parameters utilizing coaxial heat exchanger.*
- [26] BUDISULISTYO, D. and KRUMDIECK, S., 2015. *Thermodynamic and economic analysis for the pre-feasibility study of a binary geothermal power plant.*
- [27] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, Turbina [Homepage of Wikipedia, The Free Encyclopedia], [Online].
Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina> [30/04/, 2017].
- [28] Micro-Turbinas hidráulicas generadoras de energía - Tecnoturbinas.
Available: <http://tecnoturbines.com/> [30/04/, 2017].
- [29] Turbinas ORC.
Available: <http://www.enertime.com/es/tecnologia/soluciones/turbinas-orc> [15/05/, 2017].



- [30] Condensadores | ProfeDaza.
Available: <https://profedaza.wordpress.com/componentes-sistema-de-refrigeracion/condensadores/> [16/05/, 2017].
- [31] INTERCAMBIADORES DE PLACAS | lapesa.
Available: <http://www.lapesa.es/es/intercambiadores-de-placas.html> [17/05/, 2017].
- [32] Bomba de producción para plantas geotérmicas de ciclo binario orgánico Rankine o Kalina - Sulzer.
Available: <https://www.sulzer.com/es/Industries/Power-Generation/Geothermal/Binary-Cycle-Geothermal-Plant-Organic-Rankine-or-Kalina-Cycle/Production-Pump> [30/05/, 2017].
- [33] Bomba de alimentación de hidrocarburo para plantas geotérmicas de ciclo binario orgánico Rankine o Kalina - Sulzer.
Available: <https://www.sulzer.com/es/Industries/Power-Generation/Geothermal/Binary-Cycle-Geothermal-Plant-Organic-Rankine-or-Kalina-Cycle/Hydrocarbon-Feed-Pump> [30/05/, 2017].
- [34] Evaporación— ocwus.
Available: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema10/pagina_06.htm [3/06/, 2017].
- [35] Intercambiadores de calor industriales | PROINCAR S.L.
Available: <http://www.proincarc.net/es/intercambiadores-de-calor/> [5/06/, 2017].
- [36] Aralencia - Torres de refrigeración.
Available: <https://www.aralencia.com/desinfección-del-agua-por-electricidad/aplicaciones/torres-de-refrigeracion/> [5/06/, 2017].
- [37] QUOILIN, S., BROEK, M.V.D., DECLAYE, S., DEWALLEF, P. and LEMORT, V., 2013. *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*.
- [38] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS, Agua salobre [Homepage of Wikipedia, The Free Encyclopedia], [Online].
Available: <http://es.wikipedia.org/w/api.php?action=query&prop=revisions&titles=Aguasalobre&rvprop=timestamp|content&format=xml2017>.
- [39] DIPIPO, R., 2016. Chapter 23 - Environmental Impact of Geothermal Power Plants. In: R. DIPIPO, ed, *Geothermal Power Plants (Fourth Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 657-684.
- [40] SADYT| Gestión del ciclo integral del agua | plantas de tratamiento de agua.
Available: <http://www.sadyt.com/es/es/default.aspx> [20/07/, 2017].
- [41] ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM, 2012. *Manual de Geotermia: Como planificar y financiar la generación de electricidad*.
- [42] ROS MORENO, A., 2011 - last update, El agua. Desalación.



- [43] Compresión térmica del vapor | evaporación al vacío.
Available: <http://blog.condorchem.com/tag/compresion-termica-del-vapor/> [3/03/, 2017].
- [44] Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México.
Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002 [4/03/, 2017].
- [45] Microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración | Condorchem Envitech.
Available: <https://condorchem.com/es/microfiltracion-ultrafiltracion-nanofiltracion/> [6/03/, 2017].
- [46] Membranas para el tratamiento de aguas residuales.
Available: <http://blog.condorchem.com/membranas-tratamiento-aguas-residuales/> [7/03/, 2017].
- [47] Termodinámica V-40.
Available: <http://www.mspc.eng.br/termo/termod0540.shtml> [5/04/, 2017].
- [48] Ciclo de Rankine - EcuRed.
Available: https://www.ecured.cu/Ciclo_de_Rankine [5/04/, 2017].
- [49] VÉLEZ, F., SEGOVIA, J.J., MARTÍN, M.C., ANTOLÍN, G., CHEJNE, F. and QUIJANO, A., 2012. *A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation.*
- [50] UOILIN, S., 2011. Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications.
- [51] MAGO, P.J., CHAMRA, L.M., SRINIVASAN, K. and SOMAYAJI, C., 2008. *An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids.*
- [52] Calculadora TIR | Calcular Tasa Interna de Retorno.
Available: <http://es.calcuworld.com/calculadoras-empresariales/calculadora-tir/> [20/08/, 2017].